

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
МЕХАНІКО-МАШИНОБУДІВНИЙ ІНСТИТУТ
КАФЕДРА ДИНАМІКИ І МІЦНОСТІ МАШИН ТА ОПОРУ
МАТЕРІАЛІВ**

«На правах рукопису»
УДК _____

«До захисту допущено»
Завідувач кафедри
_____ Сергій ПИСКУНОВ
« ____ » _____ 2020 р.

**Магістерська дисертація
на здобуття ступеня магістра
за освітньо-професійною програмою «Динаміка і міцність машин»
зі спеціальності 131 «Прикладна механіка»
на тему: «Проектування та аналіз міцності конструкції підвісної стелі
пасажирського літака для встановлення антени»**

Виконав:
студент VI курсу, групи МП-91мп
Сонько Антон Андрійович _____

Керівник:
д.т.н., проф
Боронко Олег Олександрович _____

Рецензент:
д.т.н., проф.
Данильченко Ю.М. _____

Засвідчую, що у цій магістерській
дисертації немає запозичень з праць
інших авторів без відповідних
посилань.

Студент:
Сонько А. А. _____

Київ – 2020 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Механіко-машинобудівний інститут
Кафедра динаміки і міцності машин та опору матеріалів

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність – 131 «Прикладна механіка»

Освітньо-професійна програма – «Динаміка і міцність машин»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Сергій ПИСКУНОВ

«___» _____ 2020 р.

ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту

Соньку Антону Андрійовичу

1. Тема дисертації «Проектування та аналіз міцності конструкції підвісної стелі пасажирського літака для встановлення антени», науковий керівник дисертації Боронко Олег Олександрович, д.т.н., проф , затверджені наказом по університету від «___» _____ 2020 р. № _____
2. Термін подання студентом дисертації: 10.12.2020 р.
3. Об'єкт дослідження: підвісна стеля пасажирського літака.
4. Предмет дослідження: міцність елементів стелі при критичних навантаженнях.
5. Перелік завдань, які потрібно розробити:
 - 1) Огляд конструкції підвісної стелі літака для встановлення антени
 - 2) Визначення властивостей матеріалів та проектних величин
 - 3) Проектування та розрахунок на міцність елементів конструкції підвісної стелі для встановлення антени
 - 4) Застосування результатів чисельних і аналітичних розрахунків для формування проекту
 - 5) розробка стартап–проекту.
6. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу – 6 і більше.

7. Орієнтовний перелік публікацій – 1 і більше.

8. Дата видачі завдання: 01.09.2020 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Літературний огляд	01.09.20 - 19.09.20	
2	Визначення властивостей матеріалів та проектних величин	20.09.20 – 09.10.20	
3	Модулювання елементів конструкції за допомогою МСЕ	10.10.20 – 31.10.20	
4	Проектування елементів конструкції підвісної стелі	01.11.20 – 19.11.20	
5	Стартап-проект та висновки	20.11.20 – 10.12.20	

Студент

Антон СОНЬКО

Науковий керівник

Олег БОРОНКО

Анотація

Дана магістерська дисертація за обсягом роботи складає 72 сторінки, 45 ілюстрацій, 27 таблиць та містить 14 літературних джерел.

Підвісні стелі дуже широко використовуються для встановлення антен зв'язку із супутником. Це дозволяє літаку не втрачати своє положення, а також показує положення інших літаючих об'єктів на радарях. До встановлення антен пред'являються дуже великі вимоги стосовно конструкції місця її розташування, зовнішньої конструкції, а також конструкції підвісної стелі, на яку вона встановлюється. Саме тому елементи конструкції підвісної стелі мають бути чітко підібрані з урахуванням вимоги щодо ваги та навантаження, яке може бути сприйнято під час польоту.

Ця магістерська робота направлена на врахування вимог зазначених вище при проектуванні й аналізу основних елементів підвісної стіни літака, виходячи з умов міцності при перерозподілу максимально спричинених навантажень.

Під час проектування застосувалося два види проектування: чисельний, за допомогою програм MSC Patran, Nastran та аналітичний.

Ключові слова: підвісна стеля, антена, KRFU, рейка, опорне кріплення "кіготь", NON-9G Load кріплення, Centerline Overhead Stowage Bins, MCE, провушина, запас міцності.

Abstract

This master's dissertation consists of 72 pages, 45 illustrations, 27 tables and contains 14 literature sources.

Suspended ceilings are widely used to install satellite antennas. This allows the aircraft not to lose its position, and also shows the position of other flying objects on the radar. The installation of antennas is subject to very high requirements regarding the design of its location, external structure, as well as the design of the suspended ceiling on which it is installed. That is why the structural elements of the suspended ceiling must be clearly selected taking into account the requirements for weight and load that can be perceived during the flight.

This master's thesis is aimed at taking into account the requirements of the above in the design and analysis of the main elements of the aircraft, based on the conditions of strength in the redistribution of the maximum load.

During the design, two types of design were used: numerical, using MSC Patran, Nastran and analytical.

Keywords: suspended ceiling, antenna, KRFU, rail, support fitting “claw”, NON-9G Load fitting, Centerline Overhead Stowage Bins, FEM, lug, Margin of Safety.

ЗМІСТ:

ВСТУП.....	8
1 ОГЛЯД КОНСТРУКЦІЇ ПІДВІСНОЇ СТЕЛІ ДЛЯ ВСТАНОВЛЕННЯ АНТЕНИ.....	9
1.1 Місце встановлення антен на підвісній стелі.....	9
1.2 Конструкція підвісної стелі для встановлення антени.....	10
2 ВЛАСТИВОСТІ МАТЕРІАЛІВ ТА ПРОЕКТНІ ВЕЛИЧИНИ.....	12
2.1 Визначення матеріалів деталей та їх властивостей.....	12
2.2 Вага та навантаження.....	17
3 АНАЛІЗ КОНСТРУКЦІЇ ПІДВІСНОЇ СТЕЛІ.....	19
3.1 Моделювання конструкції за допомогою МСЕ.....	19
3.1.1 Сутність методу скінченних елементів.....	19
3.1.2 Моделювання елементів стелі за допомогою МСЕ.....	20
3.2 Розрахунок на міцність опорного кріплення “кіготь”.....	23
3.2.1 Розрахунок з’єднання опорного кріплення з рейкою.....	26
3.2.2 Розрахунок на міцність провущин опорного кріплення.....	29
3.2.3 Розрахунок на міцність заклепок опорного кріплення.....	42
3.3 Розрахунок на міцність рейок.....	47
3.3.1 Розрахунок на міцність провущин рейок.....	50
3.3.2 Розрахунок на міцність заклепок рейок.....	52
3.4 Розрахунок рейки на зминання та болтів на зріз.....	53
3.4.1 З’єднання рейки з опорним кріпленням “кіготь”.....	53
3.4.2 З’єднання рейки зі зрощенням.....	55
3.5 Розрахунок NON-9G Load кріплення.....	57
3.6 Висновки розрахунків проектування.....	60
4 РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП ПРОЕКТУ.....	61

4.1 Зміст ідеї проекту.....	61
4.2 Технологічний аудит.....	62
4.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап–проекту.....	62
4.4 Розроблення ринкової стратегії проекту.....	66
4.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту.....	68
4.6 Результати маркетингового дослідження.....	69
ВИСНОВКИ.....	70
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	71

ВСТУП

На сьогодні неможливо уявити конструкцію сучасного пасажирського літака без встановленої бортової антени. Антена має велике значення при перельотах, оскільки вона забезпечує радіозв'язок між кабіною пілотів та наземним керівництвом, а також безперебійну працездатність радарів для встановлення положення літака та інших літальних об'єктів. Виходячи з цих умов на пасажирських літаках використовують два типи конструкції антен: ті, що встановлюються на нижній частині літака (для забезпечення зв'язку з наземними пристроями) та ті, що встановлюються на верхній частині (для зв'язку з супутником на орбіті Землі).

До конструкції встановлення бортової антени пред'являють наступні вимоги:

- 1) Мінімальний аеродинамічний опір;
- 2) Висока механічна міцність повинна забезпечувати незруйновність антени під впливом перевантажень та вібрацій, виникаючих в польоті;
- 3) Зберігання міцності конструкції літака при встановленні антени;
- 4) Параметри і характеристики антен повинні зберігатися в умовах зміни температури, тиску, вологості, обмерзання, механічних впливів інших факторів, що визначаються умовами експлуатації літака.
- 5) Розміщення антен повинно забезпечувати їх електромагнітну сумісність, тобто відсутність взаємних перешкод та взаємного впливу на показники;
- 6) Конструкція та розміщення антен повинні забезпечувати простоту та зручність їх експлуатації.

Виходячи з цих вимог представлена конструкція і аналіз міцності підвісної стелі, які ми розглянемо далі.

1 ОГЛЯД КОНСТРУКЦІЇ ПІДВІСНОЇ СТЕЛІ ДЛЯ ВСТАНОВЛЕННЯ АНТЕНИ

1.1 Місце встановлення антен на підвісній стелі

Зазвичай антени встановлюються на Centerline Overhead Stowage Bins, які знаходяться над головою пасажирів центрального ряду (зображено схематично на рис. 1.1). Це зумовлено тим, що таким чином антена знаходиться прямо по нормалі до горизонтальної лінії літака, і це допомагає встановлювати більш чіткий сигнал із супутником.

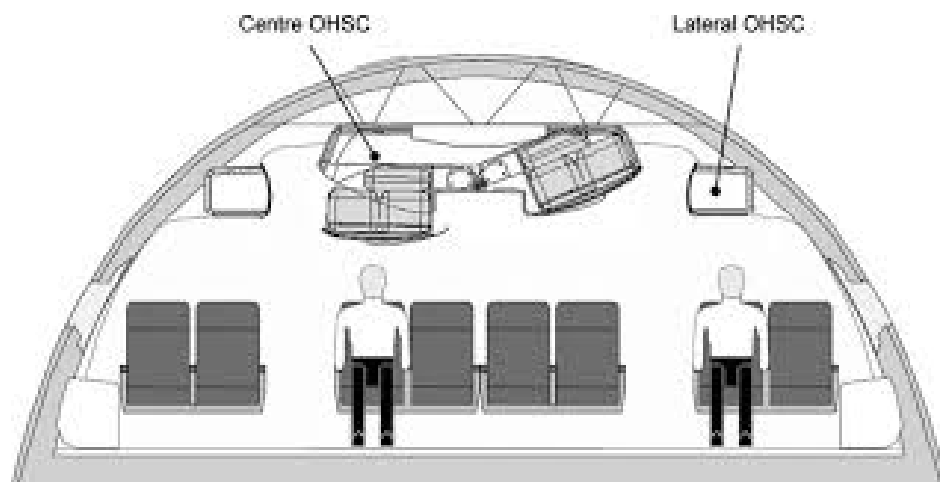


Рисунок 1.1 – Схематичне зображення розташування
Centerline Overhead Stowage Bins

Через те, що на цю частину підвісної стелі ставиться значний по важкості модуль встановлення антени (KRFU), антена встановлюється в місцях проходів, там де не має сидінь пасажирів, оскільки наявність речей у пасажирських ящиках зумовлює підвищення навантаження на їх конструкцію. Також антена не встановлюється у місці її перетину зі шпангоутом, оскільки це призведе до втрати форми фюзеляжу.

1.2 Конструкція підвісної стелі для встановлення антени

На всіх літаках Боїнгу конструкція підвісної стелі має приблизно однакову конструкцію, відмінними є тільки відстань між рейками та місце встановлення модуля KRFU за протяжністю. На рис. 1.2 показано обрану конструкцію Centerline Overhead Stowage Bins.

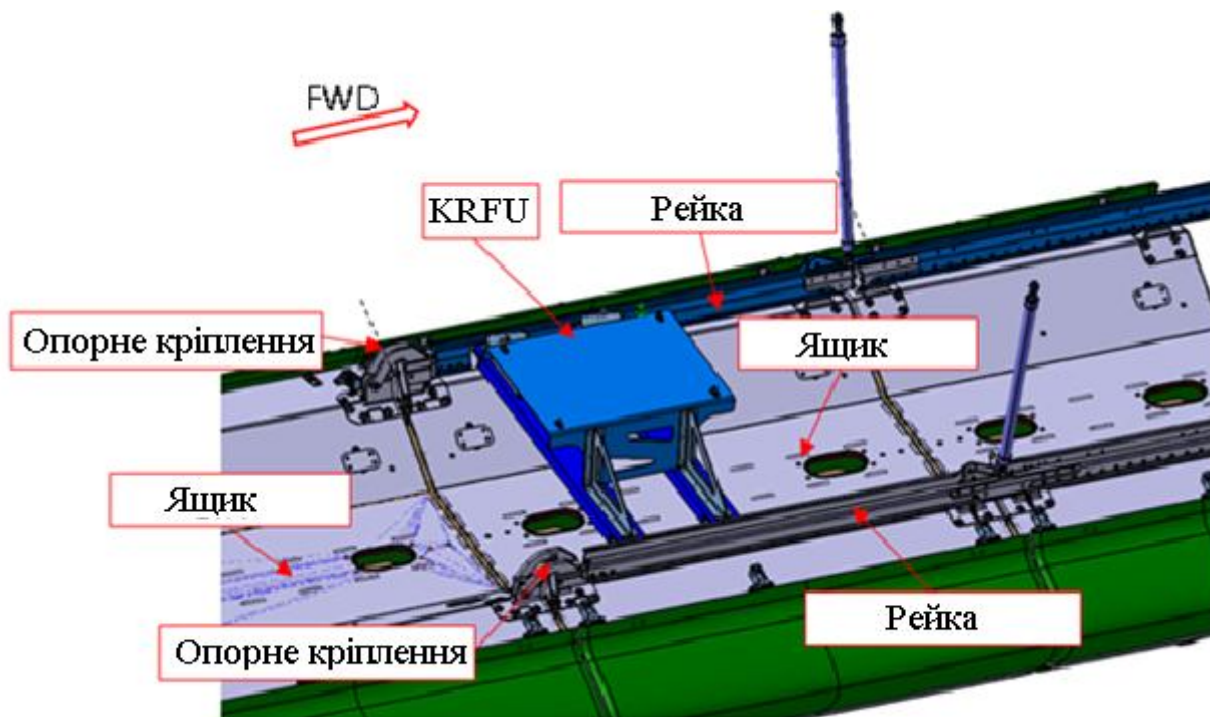


Рисунок 1.2 – Встановлення модулю KRFU,
Centerline Overhead Stowage Bins

Конструкція підвісної стелі здійснюється наступним чином: на пусті ящики підвісної стелі встановлюються рейки за допомогою NON – 9G Load кріплень та опорних кріплень. На рейки встановлюється модуль KRFU для встановлення антени. Вся ця конструкція в свою чергу підтримується вторинною опорною конструкцією за допомогою стержнів, які кріпляться до рейок.

Представлена конструкція схожа на базову установку, за винятком наступних змін:

1) Модуль KRFU переміщено на 3 дюйми (≈ 76.2 мм) за кормою – це зумовлено тим, що на місці попереднього розташування знаходиться шпангоут;

2) Було створено нові деталі: опорне кріплення “кіготь” та продовження типових деталей рейок.

Загалом конструкція встановлення антени містить такі основні деталі: рейки – 2 шт., на які встановлюється модуль KRFU; опорні кріплення “кіготь” – 2 шт., які являються більш міцними ніж звичайні кріплення, це зумовлено переміщенням модуля KRFU за кормою, що значно підвищує навантаження на нього; NON-9G Load кріплення – 2 шт., це кріплення, які встановлюються на ящики та кріпляться до опорних кріплень “когтей” та не розраховані на навантаження у 9G.

2 ВЛАСТИВОСТІ МАТЕРІАЛІВ ТА ПРОЕКТНІ ВЕЛИЧИНИ

2.1 Визначення матеріалів деталей та їх властивостей

1) Рейка

Для рейки встановлюємо матеріал заготівлі: пластина з алюмінієвого сплаву марки 7075-T7351, базису В, товщина якої входить у діапазон 2.001 – 2.500 in (50.825 – 63.500 мм). Властивості даного матеріалу зазначені у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Властивості матеріалу рейки
(пластина з алюмінієвого сплаву 7075-T7351)

AS-ROLLED THICKNESS, IN	0.040 - 0.249			0.250-0.499		0.500-1.000		1.001-1.500		1.501-2.000		2.001-2.500		2.501-3.000		3.001-3.500		3.501-4.000	
BASIS	A	B	S	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
F_{tu} , ksi ④																			
L	---	---	67	68	71	69	71	69	71	69	71	66	69	64	67	63	66	61	64
LT	67	69	---	69	72	69	72	69	72	69	72	66	69	64	67	63	66	61	64
ST	---	---	---	---	---	---	---	---	---	65	68	62	65	60	63	59	62	58	60
F_{ty} , ksi																			
L	---	---	55	57	60	57	61	57	61	57	60	52	57	49	55	49	54	48	51
LT	55	57	---	57	60	57	61	57	61	57	60	52	57	49	55	49	54	48	51
ST	---	---	---	---	---	---	---	---	---	54	57	50	54	47	53	47	52	46	49
F_{cy} , ksi																			
L	54	56	---	56	59	56	60	56	60	56	58	50	55	47	53	47	52	46	48
LT	57	59	---	59	62	59	63	59	63	59	62	54	59	51	57	51	56	50	53
ST	---	---	---	---	---	---	---	---	---	61	64	55	61	51	58	50	56	48	52
F_{su} , ksi																			
L	38⑤	39⑤	---	39	40	39	41	40	41	40	42	39	41	38	40	38	40	37	39
LT	38⑤	39⑤	---	38	40	38	40	39	41	40	42	39	41	38	40	38	40	37	39
F_{sy} , ksi ⑥																			
L	---	---	31⑤	32	34	32	35	33	35	33	35	30	33	28	32	29	32	29	30
LT	32⑤	33⑤	---	32	34	32	34	33	35	34	36	31	34	30	33	30	33	30	32
F_{bru} , ksi ⑦																			
e/D=1.5 L	94⑤	97⑤	---	92	96	93	96	94	98	95	99	92	96	90	94	89	94	86	91
LT	94⑤	97⑤	---	93	96	93	97	94	99	95	100	93	96	91	94	90	94	87	92
e/D=2.0 L	121⑤	124⑤	---	118	123	119	124	121	127	122	128	119	124	116	122	114	121	112	117
LT	121⑤	124⑤	---	119	124	120	125	122	127	122	128	119	124	116	122	115	121	112	117
F_{bry} , ksi ⑦																			
e/D=1.5 L	75⑤	77⑤	---	72	77	73	78	75	80	76	80	71	78	68	76	68	76	68	73
LT	75⑤	77⑤	---	72	76	73	77	75	80	76	80	71	77	68	76	69	76	68	73
e/D=2.0 L	90⑤	94⑤	---	86	92	87	94	89	95	91	95	84	92	80	90	81	89	79	85
LT	90⑤	94⑤	---	87	94	88	94	91	97	93	97	86	94	82	92	83	91	82	86
Elong., % ⑧ L	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
LT	8	8	---	7	7	7	7	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6

Де: Базис В означає багатошляхову передачу навантаження на інші деталі;

$F_{tuL} = 69 \text{ ksi} (\approx 475.7 \text{ МПа})$ – допустиме навантаження міцності на розтяг в напрямленні зерна L (за довжиною рейки);

$F_{tuLT} = 69 \text{ ksi} (\approx 475.7 \text{ МПа})$ – допустиме навантаження міцності на розтяг в напрямленні зерна LT (за шириною рейки);

$F_{tuST} = 65 \text{ ksi} (\approx 448.2 \text{ МПа})$ – допустиме навантаження міцності на розтяг в напрямку зерна ST (за товщиною рейки);

$F_{tyL} = 57 \text{ ksi} (\approx 393 \text{ МПа})$ – допустиме навантаження текучості на розтяг в напрямку зерна L (за довжиною рейки);

$F_{tyLT} = 57 \text{ ksi} (\approx 393 \text{ МПа})$ – допустиме навантаження текучості на розтяг в напрямку зерна LT (за шириною рейки);

$F_{tyST} = 54 \text{ ksi} (\approx 372.3 \text{ МПа})$ – допустиме навантаження текучості на розтяг в напрямку зерна ST (за товщиною рейки);

$F_{cyL} = 55 \text{ ksi} (\approx 379.2 \text{ МПа})$ – допустиме навантаження текучості на стискання в напрямку зерна L (за довжиною рейки);

$F_{cyLT} = 59 \text{ ksi} (\approx 406.8 \text{ МПа})$ – допустиме навантаження текучості на стискання в напрямку зерна LT (за шириною рейки);

$F_{cyST} = 61 \text{ ksi} (\approx 420.6 \text{ МПа})$ – допустиме навантаження текучості на стискання в напрямку зерна ST (за товщиною рейки);

$F_{suL} = 41 \text{ ksi} (\approx 282.7 \text{ МПа})$ – допустиме навантаження міцності на зсув в напрямку зерна L (за довжиною рейки);

$F_{suLT} = 41 \text{ ksi} (\approx 282.7 \text{ МПа})$ – допустиме навантаження міцності на зсув в напрямку зерна LT (за шириною рейки);

$F_{syL} = 33 \text{ ksi} (\approx 227.5 \text{ МПа})$ – допустиме навантаження текучості на зсув в напрямку зерна L (за довжиною рейки);

$F_{syLT} = 34 \text{ ksi} (\approx 234.4 \text{ МПа})$ – допустиме навантаження текучості на зсув в напрямку зерна LT (за шириною рейки);

$F_{bruL}^{\frac{e}{D}=1.5} = 96 \text{ ksi} (\approx 661.9 \text{ МПа})$ – допустиме навантаження міцності на зминання в напрямку зерна L (за довжиною рейки), при співвідношенні відстані від середини отвору до кромки (e) до діаметру отвору (D) - 1.5;

$F_{bruLT}^{\frac{e}{D}=1.5} = 96 \text{ ksi} (\approx 661.9 \text{ МПа})$ – допустиме навантаження міцності на зминання в напрямку зерна LT (за шириною рейки), при співвідношенні відстані від середини отвору до кромки (e) до діаметру отвору (D) - 1.5;

$F_{bruL}^{\frac{e}{D}=2.0} = 124 \text{ ksi} (\approx 855 \text{ МПа})$ – допустиме навантаження міцності на зминання в напрямку зерна L (за довжиною рейки), при співвідношенні відстані від середини отвору до кромки (e) до діаметру отвору (D) – 2.0;

$F_{bruLT}^{\frac{e}{D}=2.0} = 124 \text{ ksi} (\approx 885 \text{ МПа})$ – допустиме навантаження міцності на зминання в напрямку зерна LT (за шириною рейки), при співвідношенні відстані від середини отвору до кромки (e) до діаметру отвору (D) – 2.0;

$F_{bryL}^{\frac{e}{D}=1.5} = 78 \text{ ksi} (\approx 537.8 \text{ МПа})$ – допустиме навантаження текучості на зминання в напрямку зерна L (за довжиною рейки), при співвідношенні відстані від середини отвору до кромки (e) до діаметру отвору (D) - 1.5;

$F_{bryLT}^{\frac{e}{D}=1.5} = 77 \text{ ksi} (\approx 530.9 \text{ МПа})$ – допустиме навантаження текучості на зминання в напрямку зерна LT (за шириною рейки), при співвідношенні відстані від середини отвору до кромки (e) до діаметру отвору (D) - 1.5;

$F_{bryL}^{\frac{e}{D}=2.0} = 92 \text{ ksi} (\approx 634,3 \text{ МПа})$ – допустиме навантаження текучості на зминання в напрямку зерна L (за довжиною рейки), при співвідношенні відстані від середини отвору до кромки (e) до діаметру отвору (D) – 2.0;

$F_{bryLT}^{\frac{e}{D}=2.0} = 94 \text{ ksi} (\approx 648.1 \text{ МПа})$ – допустиме навантаження текучості на зминання в напрямку зерна LT (за шириною рейки), при співвідношенні відстані від середини отвору до кромки (e) до діаметру отвору (D) – 2.0.

2) Опорне кріплення “кіготь”

Для опорного кріплення “кіготь” встановлюємо матеріал заготівлі: пластина з алюмінієвого сплаву марки 7050-T7451, базису В, товщина якої входить у діапазон 2.001 – 3.000 in (50.825 – 76.2 мм). Властивості даного матеріалу зазначені у таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 - Властивості матеріалу опорного кріплення “кіготь”
(пластина з алюмінієвого сплаву 7050-T7451)

THICKNESS, in		0.250–1.500		1.501–2.000		2.001–3.000		3.001–4.000		4.001–5.000		5.001–6.000		6.001–7.000		7.001–8.000	
BASIS		A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
F_{tu} , ksi	L ①	74	76	74	76	73	75	72	74	71	73	70	72	69	72	68	71
	LT	74	76	74	76	73	75	72	75	71	74	70	73	69	72	68	71
	ST	–	–	–	–	68	72	68	71	67	70	66	69	66	68	65	67
F_{ty} , ksi	L	64	66	64	66	63	66	62	65	61	65	60	63	59	62	58	63
	LT	64	66	64	66	63	66	62	65	61	64	60	62	59	62	58	61
	ST	–	–	–	–	59	61	57	60	57	60	57	59	56	58	55	58
F_{ty} , ksi	L	63	64	62	64	61	64	60	63	58	61	57	59	56	59	55	57
	LT	66	68	67	69	66	69	65	68	64	67	63	66	60	63	59	62
	ST	–	–	–	–	63	66	63	66	63	66	62	64	60	63	59	62
F_{su} , ksi	L-S	43	44	44	45	43	45	44	45	43	45	43	45	44	46	44	46
	T-S	42	43	43	44	43	44	43	45	43	45	43	45	44	46	44	46
	S-L	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
F_{sy} , ksi	L-S ③	37*	38*	38*	39*	38	40	39	40	38	40	38	40	38	40	38	40
	T-S	36*	37*	37*	38*	38	38	37	39	37	40	37	39	38	40	38	40
F_{bru} , ksi ②	(e/D = 1.5) L	96	99	98	101	97	100	96	100	96	100	94	99	96	101	93	97
	LT	98	101	100	103	99	102	98	102	97	102	96	101	98	103	96	101
	ST	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
e/D = 2.0	L	126	130	128	131	127	130	126	130	124	130	123	128	122	129	119	124
	LT	126	130	128	131	127	130	127	130	125	130	124	130	125	131	123	129
	ST	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
F_{bry} , ksi ②	e/D = 1.5 L	77	80	80	83	80	84	81	85	81	86	82	85	76	80	75	78
	LT	78	80	81	83	80	85	81	86	81	86	82	85	76	81	76	79
	ST	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
e/D = 2.0	L	91	94	94	96	94	98	94	98	94	99	94	97	89	94	88	92
	LT	93	95	95	99	95	100	95	100	95	100	95	99	89	94	88	93
	ST	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Elong., %	L ④	10		10		9		9		9		8		7		6	
	LT	9		9		8		6		5		4		4		4	
	ST	---		--		3		3		3		3		3		3	

Де зазначені величини мають відповідні визначення, що й величини матеріалу рейки:

$$F_{tuL} = 75 \text{ ksi } (\approx 517.1 \text{ МПа});$$

$$F_{tuLT} = 75 \text{ ksi } (\approx 517.1 \text{ МПа});$$

$$F_{tuST} = 72 \text{ ksi } (\approx 496.4 \text{ МПа});$$

$$F_{tyL} = 66 \text{ ksi } (\approx 455 \text{ МПа});$$

$$F_{tyLT} = 66 \text{ ksi } (\approx 455 \text{ МПа});$$

$$F_{tyST} = 61 \text{ ksi } (\approx 420.6 \text{ МПа});$$

$$F_{cyL} = 64 \text{ ksi } (\approx 441.3 \text{ МПа});$$

$$F_{cyLT} = 69 \text{ ksi } (\approx 475.7 \text{ МПа});$$

$$F_{cyST} = 66 \text{ ksi } (\approx 455 \text{ МПа});$$

$F_{suL-S} = 45 \text{ ksi } (\approx 310.3 \text{ МПа})$ - допустиме навантаження міцності на зсув в напрямку зерна L-S (під кутом 45° між довжиною та товщиною опорного кріплення “кігтя”);

$F_{suT-S} = 44 \text{ ksi } (\approx 303.4 \text{ МПа})$ - допустиме навантаження міцності на зсув в напрямку зерна T-S (під кутом 45° між шириною та товщиною опорного кріплення “кігтя”);

$F_{syL-S} = 40 \text{ ksi } (\approx 275.8 \text{ МПа})$ - допустиме навантаження текучості на зсув в напрямку зерна L-S (під кутом 45° між довжиною та товщиною опорного кріплення “кігтя”);

$F_{syT-S} = 38 \text{ ksi } (\approx 262 \text{ МПа})$ - допустиме навантаження текучості на зсув в напрямку зерна T-S (під кутом 45° між шириною та товщиною опорного кріплення “кігтя”);

$$F_{bruL}^{\frac{e}{D}=1.5} = 100 \text{ ksi } (\approx 689.5 \text{ МПа});$$

$$F_{bruLT}^{\frac{e}{D}=1.5} = 102 \text{ ksi } (\approx 703.3 \text{ МПа});$$

$$F_{bruL}^{\frac{e}{D}=2.0} = 130 \text{ ksi } (\approx 896.3 \text{ МПа});$$

$$F_{bruLT}^{\frac{e}{D}=2.0} = 130 \text{ ksi } (\approx 896.3 \text{ МПа});$$

$$F_{bryL}^{\frac{e}{D}=1.5} = 84 \text{ ksi } (\approx 579.2 \text{ МПа});$$

$$F_{bryLT}^{\frac{e}{D}=1.5} = 85 \text{ ksi } (\approx 579.2 \text{ МПа});$$

$$F_{bryL}^{\frac{e}{D}=2.0} = 98 \text{ ksi } (\approx 675.7 \text{ МПа});$$

$$F_{bryLT}^{\frac{e}{D}=2.0} = 100 \text{ ksi } (\approx 689.5 \text{ МПа}).$$

3) NON-9G Load кріплення

Матеріал і властивості встановлюємо такі ж самі, як і в існуючій конструкції. Матеріал заготівлі: пластина з алюмінієвого сплаву 7075-T7451, базису В, товщина якої входить у діапазон 0.250 – 8.500 in (6.35 – 215.9 мм).

Основні властивості даного матеріалу мають таке саме значення як і матеріалів, які було розглянуто вище:

$$F_{tuL} = 72 \text{ ksi } (\approx 496.4 \text{ МПа});$$

$$F_{tyL} = 63 \text{ ksi } (\approx 434.4 \text{ МПа});$$

$$F_{tuLT} = 69 \text{ ksi } (\approx 475.7 \text{ МПа});$$

$$F_{tyLT} = 59 \text{ ksi } (\approx 406.8 \text{ МПа});$$

$$F_{bruL}^{\frac{e}{D}=1.5} = 99 \text{ ksi } (\approx 682.6 \text{ МПа}).$$

2.2 Вага та навантаження

Максимально допустимий внутрішній коефіцієнт навантаження відповідно до вимог FAA (Federal Aviation Administration) та внутрішніх вимог Боїнгу [1,2] зведено до табл. 2.3.

**Таблиця 2.3 – Максимально допустимий коефіцієнт навантаження
відповідно до вимог FAA та внутрішніх вимог Боїнгу**

Напрямок навантаження	Вимоги FAA	Внутрішні вимоги Боїнгу	Допустимий коефіцієнт навантаження, обраний для аналізу
Спереду	9.0 G	-	9.0 G
Вгору	6.0 G	7.68 G	7.68 G
Вбік	3.0 G	-	3.0 G
Вгору	3.0 G	-	3.0 G
Назад	1.5 G	-	1.5 G
Вниз + Вбік	1.5 G Вбік + 1.5 G Вниз	1.63 G Вбік + 1.5 G Вниз	3.0 G Вбік + 1.5 G Вниз
Назад + Вгору	1.0 G Назад + 1.5 G Вгору	1.5 G Назад + 3.0 G Вгору	1.5 G Назад + 3.0 G Вгору
Вперед + Вгору	0.8 G Вперед + 1.5 G Вгору	1.5 G Вперед + 3.0 G Вгору	1.5 G Вперед + 3.0 G Вгору
Вперед + Вниз	1.7 G Вперед + 3.0 G Вгору	1.5 G Вперед + 7.68 G Вниз	1.5 G Вперед + 7.68 G Вниз
Назад + Вниз	-	1.5 G Назад + 7.68 G Вниз	1.5 G Назад + 7.68 G Вниз

Примітка: Випадки декомпресійного навантаження охоплюються випадками інерційного навантаження вгору/вниз.

3 АНАЛІЗ КОНСТРУКЦІЇ ПІДВІСНОЇ СТЕЛІ

3.1 Моделювання конструкції за допомогою МСЕ

3.1.1 Сутність методу скінченних елементів

Основна ідея методу скінченних елементів (МСЕ) полягає в тому, що мінімізація функціоналу варіаційної задачі здійснюється на сукупності функцій, кожна з яких визначена на своїй підобласті (на скінченному елементі) [3-5]. МСЕ базується на одному із варіаційних методів – методах Рітца, Бубнова [6] і належить до одного із напрямків діакоптики – загального методу дослідження складних систем за допомогою їх розкладання. При цьому довільна розрахункова область розбивається сіткою на скінченні елементи. Сітка являє собою сукупність довільних трикутників, чотирикутників, чотиригранників або шестигранників, всередині кожного з яких задаються деякі функції форми, які дають змогу визначити шукану функцію всередині елемента за її значеннями у вузлах, тобто в місцях стиковки скінченних елементів між собою. За координатні функції беруть функції, тотожно рівні нулю всюди, крім одного скінченного елемента, всередині якого вони є функціями форми.

Таким чином, для того щоб визначити безперервну величину, необхідно визначити її величину у вузлах.

Основні етапи створення дискретної моделі невідомої величини наступні:

1. У досліджуваній області задається кінцеве число точок (вузлів).
2. Значення безперервної величини в кожному вузлі вважаються невідомими, вони повинні бути визначені.
3. Досліджувана область розбивається на кінцеве число підобластей (елементів), що мають спільні точки (вузли).
4. Безперервна величина в кожному елементі апроксимується поліномом, який визначається за допомогою вузлових значень цієї величини: для кожного елемента визначається свій поліном, але його коефіцієнти

підбираються так, щоб зберігалася безперервність величини на кожному кордоні елемента. [7]

3.1.2 Моделювання елементів стелі за допомогою MCE

Тонка сітка MCE для Centerline Overhead Stowage Bins була створена для опорних кріплень “кіготь” та нового аналізу напружень рейок, модель MCE показана на рис. 3.1. Ця модель використовується для моделювання нових рейок та опорного кріплення відповідно до нової конструкції.

MCE складається з:

- Ящиків, змодельованих елементами SHELL QUAD4;
- Рейок, змодельованих як елементи CBAR з відповідним перетином;
- Опорних кріплень, змодельованих твердими елементами.

Модель навантажується:

- згрупованою масою від KRFU (вага становить близько 45 lb (≈ 200 Н), включаючи масу обладнання та кріплень, 45 фунтів використовуються в MCE консервативно).
- Вага конструкції, що застосовується через густину.

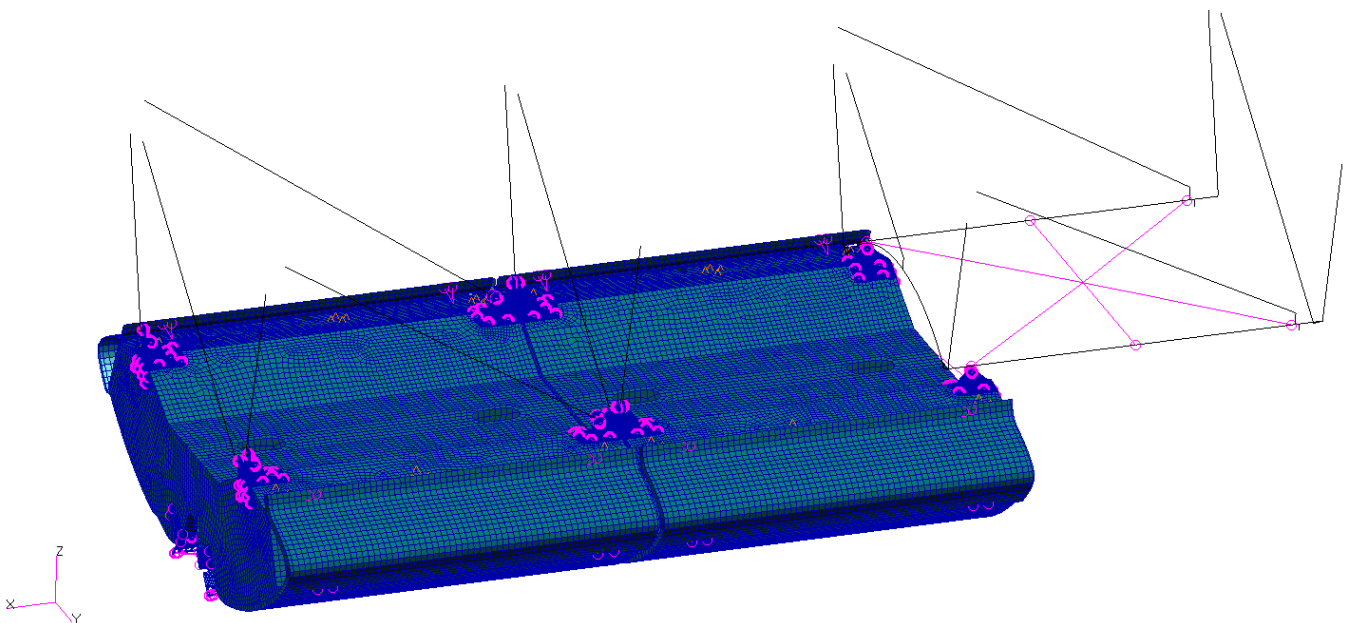


Рисунок 3.1 – CE-модель Centerline Overhead Stowage Bins

“Ланцюгова” СЕ-модель для підтримуючої конструкції Centerline Overhead Stowage Bins показана на рис. 3.2.

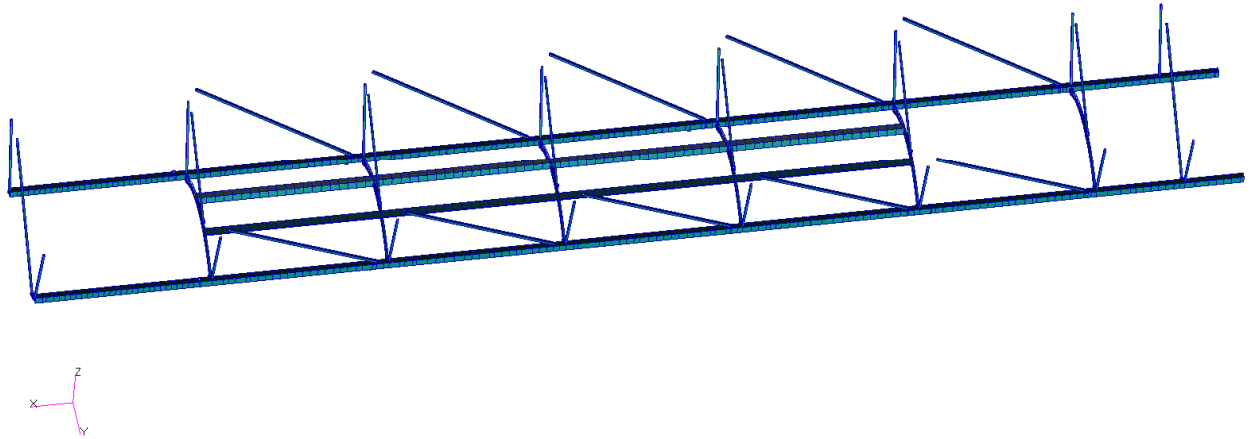


Рисунок 3.2 – СЕ-модель підтримуючої конструкції Centerline Overhead Stowage Bins

Вага елементів Centerline Overhead Stowage Bins та прикладене навантаження для СЕ-моделі “ланцюгової” підтримуючої конструкції показані на табл. 3.1. Поточна конфігурація Centerline Overhead Stowage Bins не має додаткового консервативного класу розділювачів (Class Divides), отже, сила від класу розділювачів ($39 \text{ lb} \times 2 = 78 \text{ lb} (\approx 347 \text{ N})$, див. табл. 3.1) опускається.

На рисунку 3.3 показано комбіновану та оновлену СЕ-модель для вторинної підтримуючої конструкції Centerline Overhead Stowage Bins.

Таблиця 3.1 - Вага елементів Centerline Overhead Stowage Bins та прикладені навантаження

	Description	Size	Weight/Unit [lbs]	Qty. of Unit	Total Weight [lbs]	Weight applicable to Direction	
						Fwd, Aft	Side, Up, Down
Forward/Aft Bin	Bin Structure	48"	22.9	1	22.9	22.9	22.9
	Bin Bucket with mirror	48"	11.7	2	23.4	23.4	23.4
	Bin Content	48"	77	2	154	F 154	154
	End Cap with PAX Sign	12"	12.5	1	12.5	Δ 12.5	12.5
	Ceiling	48"	7	1	7	Δ 7	7
	Ceiling Light	48"	6.5	2	13	Δ 13	13
	Moose Nose, B-Bin with seal and GI Light	48"	3.1	2	6.2	6.2	6.2
	PSU	48"	30.84	1	30.84	Δ 30.84	52.55
	PSU Rail Assy. 48" Center Left	48"	1.073	1	1.073	Δ 1.073	1.073
	PSU Rail Assy. 48" Center Right	48"	1.073	1	1.073	Δ 1.073	1.073
	PSU Duct and Wiring	48"	0.6	1	0.6	Δ 0.6	0.6
	Class Divider	Underbin	39	2	78	F 78	0
	WELS Control Unit	N/A	0.6	2	1.2	Δ 1.2	1.2
	WELS Battery Unit	N/A	0.5	2	1	Δ 1	1
	Stowbin Wire IRM CTR	N/A	1.4	1	1.4	Δ 1.4	1.4
	Quick Release Pin	N/A	0.03	8	0.2	Δ 0.2	0.2
	Curtain	N/A	13.6	2	27.3	Δ 27.3	27.3
	Underbin Curtain	N/A	7.6	1	7.6	Δ 7.6	7.6
Structural Weight						52.5	52.5
Equipment Weight Δ						104.8	126.5
Applied Force (F)						232.0	154.0
Total Applied Load						389.3	333.0
Forward/Aft Bin	Bin Structure	48"	23.1	1	23.1	23.1	23.1
	Bin Bucket with mirror	48"	11.7	2	23.4	23.4	23.4
	Bin Content	48"	77	2	154	F 154	154
	Ceiling	48"	7	1	7	Δ 7	7
	Ceiling Light	48"	6.5	2	13	Δ 13	13
	PSU	48"	52.55	1	52.55	Δ 52.55	52.55
	PSU Rail Assy. 48" Center Left	48"	1.073	1	1.073	Δ 1.073	1.073
	PSU Rail Assy. 48" Center Right	48"	1.073	1	1.073	Δ 1.073	1.073
	PSU Duct and Wiring	48"	0.6	1	0.6	Δ 0.6	0.6
	Moose Nose, B-Bin with seal and GI Light	48"	3.1	2	6.2	6.2	6.2
	Quick Release Pin	N/A	0.03	5	0.1	Δ 0.1	0.1
Structural Weight						52.7	52.7
Equipment Weight Δ						75.40	75.40
Applied Force (F)						154	154
Total Applied Load						282.10	282.10
Overall Applied Load						671.38	615.09

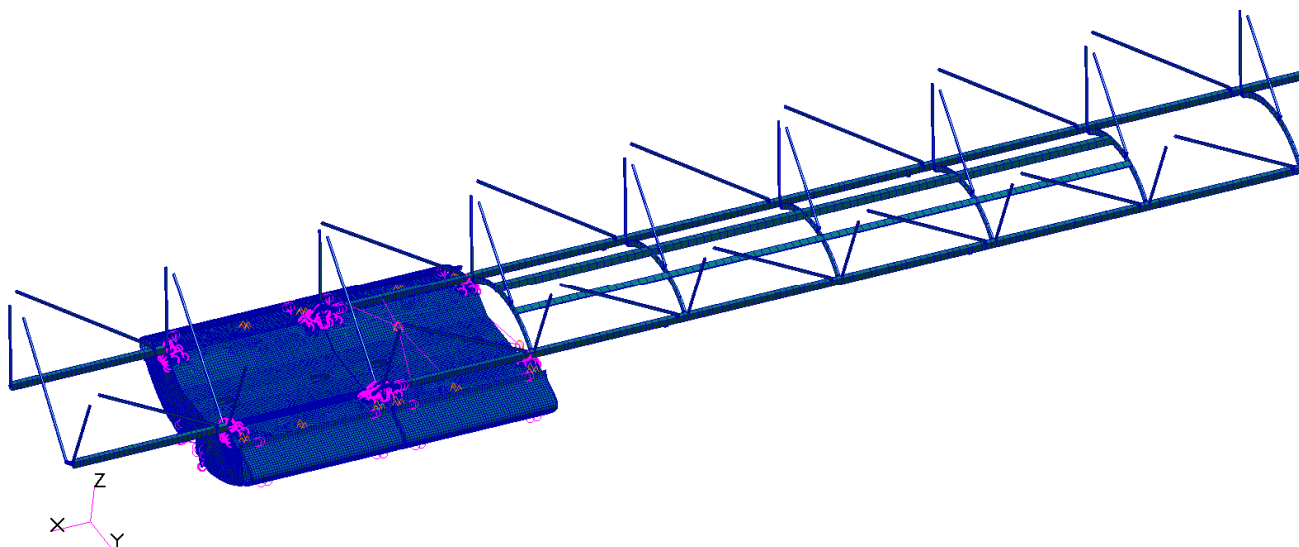


Рисунок 3.3 – Комбінована СЕ-модель вторинної підтримуючої конструкції Centerline Overhead Stowage Bins

3.2 Розрахунок на міцність опорного кріплення “кіготь”

Опорні кріплення виготовляються з пластини з алюмінієвого сплаву 7050 (див. розділ 2.1).

Структурний аналіз цих кріплень виконується методом ручного розрахунку та методом МСЕ. СЕ-модель включає властивості матеріалу, перелічені в табл. 2.2, а загальний вигляд кріплення “кіготь” показаний на рис. 3.4.

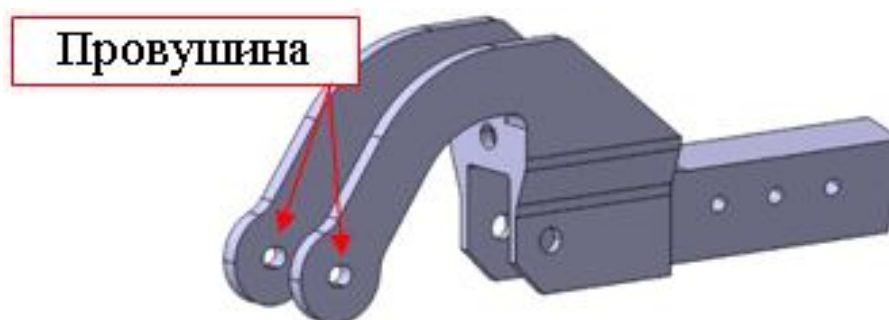


Рисунок 3.4 – Загальний вигляд кріплення “кіготь”

При моделюванні СЕ-моделі опорного кріплення “кіготь” використовуються тверді елементи TET10. MPC (RBE2) використовуються для імітації з’єднань з підтримуючими рейками (див. рис. 3.5).

Отвори (довжиною 0,5 in (≈ 12.7 мм)) на передніх провушинах (рис. 3.4) призначені для роботи, коли G-коефіцієнти вперед/назад нижчі за 3. Мета цього полягає в тому, щоб уникнути будь-яких проблем руйнування опорного кріплення під згином під час нормальної роботи, а також передавати лише високі поздовжні навантаження, такі як при виникненні аварії. СЕ-модель запускалась із роз’єднаними з’єднаннями на цих провушинах, щоб перевірити, чи відносні переміщення не перевищують допустимі розміри отворів у випадку коефіцієнту навантаження 3G вперед/назад. Ця перевірка пройшла, показуючи прийнятні результати.

Однак було зроблено консервативне припущення для аналізу кріплення, наприклад, щоб опустити отвір і утримувати з’єднання з MPC (RBE2), щоб отримати максимальний рівень навантаження, що проходить через кріплення.

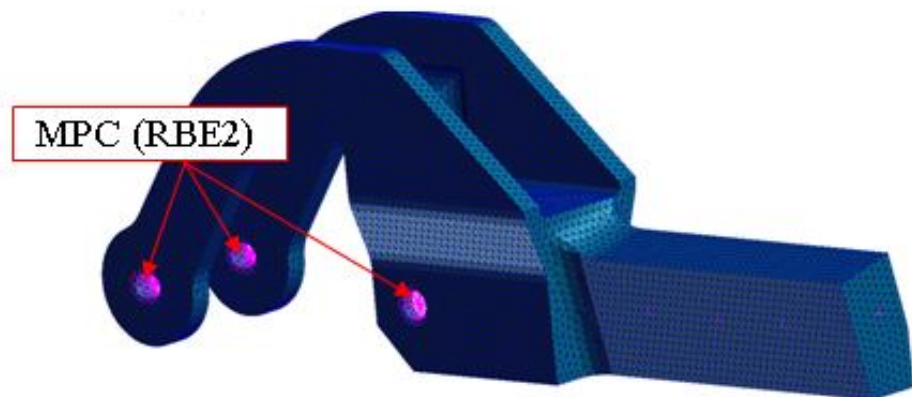


Рисунок 3.5 – СЕ-сітка опорного кріплення “кіготь”

Випадки критичного навантаження для аналізу опубліковані в табл. 3.2.

Величини максимальних напружень фон Мізеса для кріплень, під дією критичних навантажень відповідно до табл. 2.3, зведено в табл. 3.2.

Таблиця 3.2 – Величини максимальних напружень фон Мізеса для опорних кріплень “кіготь”

Випадок навантаження	Напруження фон Мізеса, ksi (МПа)
9G Вперед	33.0 (≈ 227.5)
3G Вбік	16.5 (≈ 113.8)
7.68G Вниз	5.44 (≈ 37.5)
3.0G Вгору	2.17 (≈ 15)

Ділянки навколо кріплення/заклепки (вимкнені елементи на рис. 3.6) виключаються з напруженого забарвлення фон Мізеса, оскільки ці ділянки створюють нереальні локальні пікові напруги через ефект конкретного моделювання кріплення (RBE2) та/або обмежень. Ці специфічні ділянки зазвичай охоплюються ручною перевіркою розтягу/зсуву кріплень та змінання деталей на основі внутрішніх навантажень, витягнутих із MSE, але не напружень (див. подальші відповідні розділи).

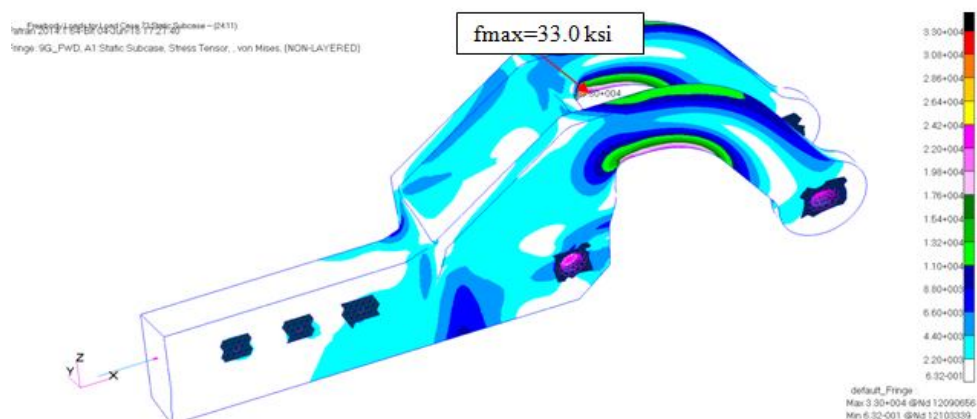


Рисунок 3.6 – Розподілення напружень фон Мізеса, випадок 9G навантаження

Перевірка на згин:

$F_{\max} = 33 \text{ ksi} (\approx 227.5 \text{ МПа})$ – максимальне напруження фон Мізеса;

$F_{tu} = 72 \text{ ksi} (\approx 496.4 \text{ МПа})$ (див. табл. 2.2) – границя міцності матеріалу;

$k_{\text{оп.кр.}} = 1.33$ – коефіцієнт безпеки опорного кріплення [2].

Запас міцності при перевірці на згин буде дорівнювати:

$$MS_{\text{зг.оп.кр.}} = \frac{F_{tu}}{F_{\max} \cdot k_{\text{оп.кр.}}} - 1 = \frac{72}{33 \cdot 1.33} - 1 = 0.64. \quad (3.2.1)$$

Конструкція опорного кріплення задовольняє перевірку на згин.

3.2.1 Розрахунок з'єднання опорного кріплення з рейкою

З'єднання між опорними кріпленнями та рейками показано на рис. 3.7.

Переріз А-А з від'ємною площею перевіряється на згин за допомогою стандартних методів аналізу перерізу. Див. рис. 3.8, що показує характеристики перерізу А-А.

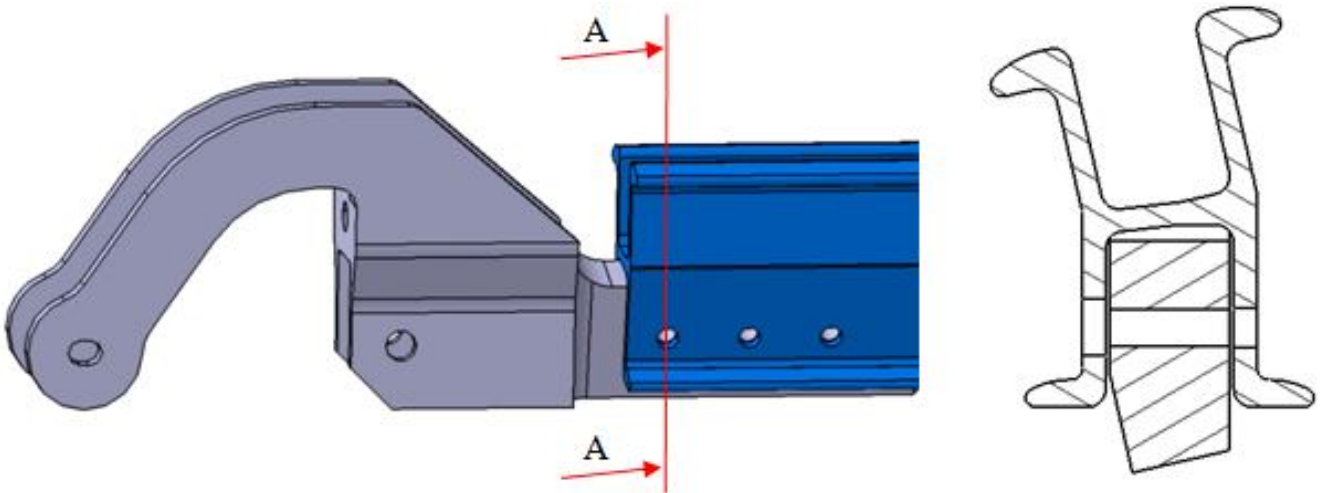


Рисунок 3.7 – Переріз А-А з'єднання опорного кріплення з рейкою

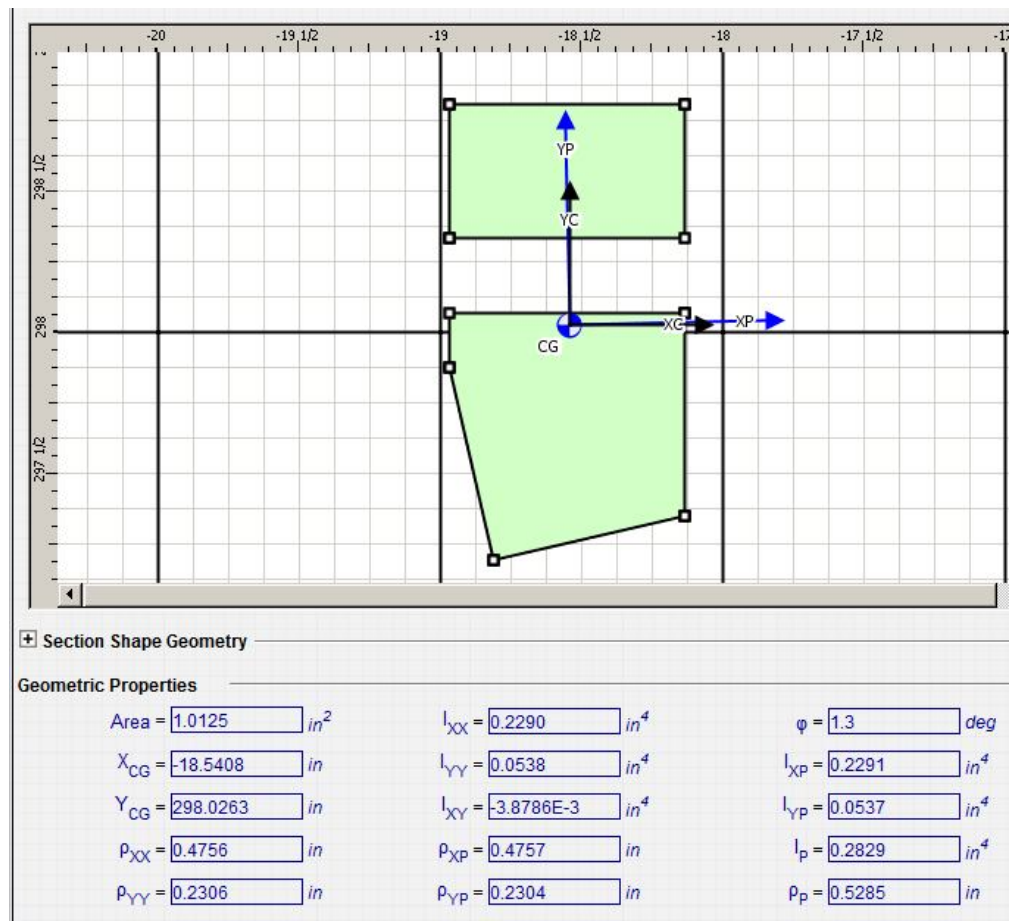


Рисунок 3.8 – Властивості перерізу А-А

Навантаження, перелічені нижче (табл. 3.3), є конвертом найбільших навантажень для всіх випадків навантаження від FEM.

Таблиця 3.3 – Максимальні навантаження усіх випадків навантаження опорного кріплення

F/M	F _x , lb (H)	F _y , lb (H)	F _z , lb (H)	M _x , in-lb (H·м)	M _y , in-lb (H·м)	M _z , in-lb (H·м)
MAX.	-40 (≈ -178)	125 (≈ 556)	1394 (≈ 6200)	-1331 (≈ -1805)	421 (≈ 571)	-19 (≈ 26)

Розрахунок максимального напруження в перерізі А-А зображено на рис. 3.9. Розрахунок відбувається при складному навантаженні: згин та осьове навантаження. З цього рисунку маємо: $F_{\max} = 8.534 \text{ ksi} (\approx 58.8 \text{ МПа})$.

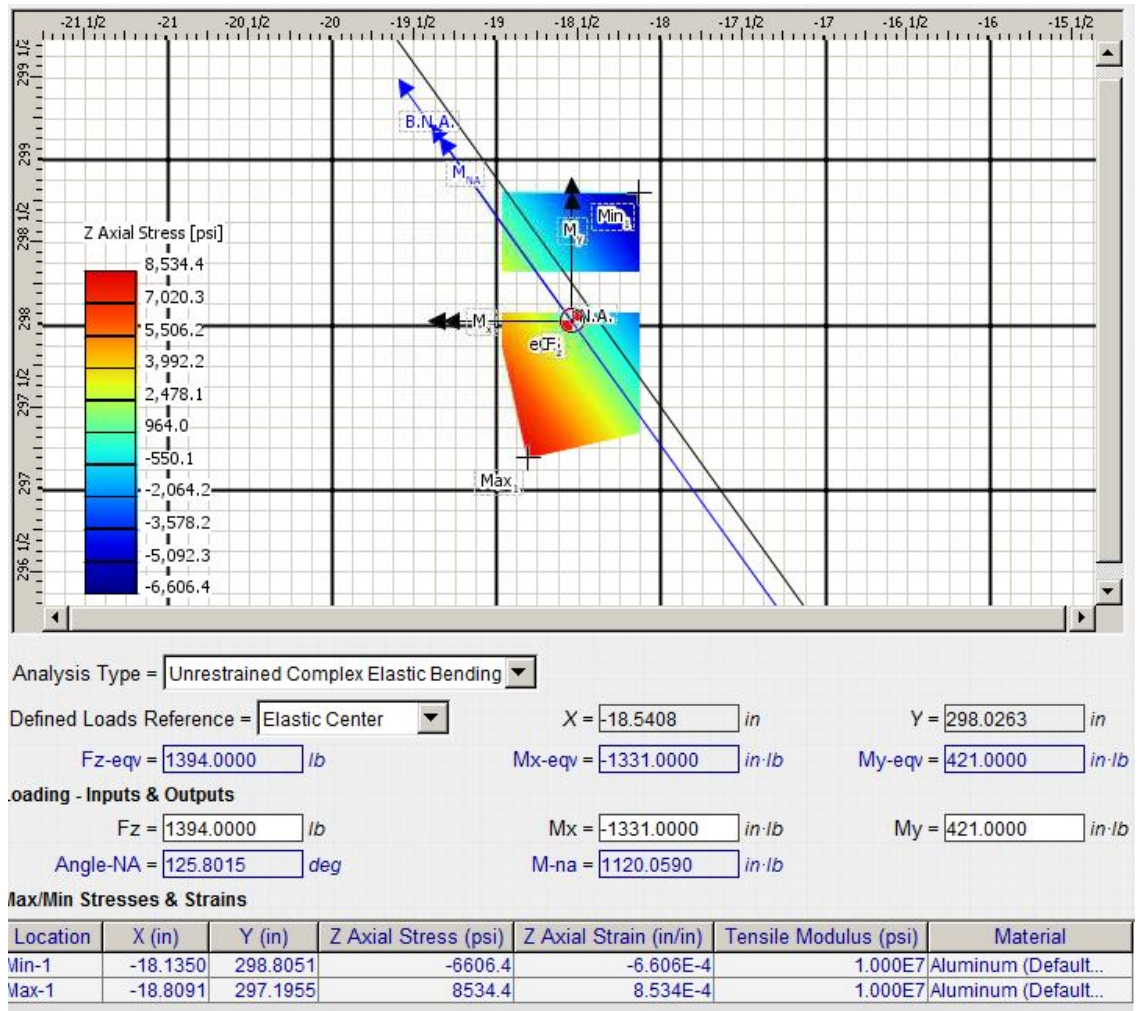


Рисунок 3.9 – Розрахунок максимального напруження в перерізі А-А
Перевірка на складне навантаження (згин та осьове навантаження)
перерізу А-А:

$$F_{\max} = 8.534 \text{ ksi} (\approx 58.8 \text{ МПа});$$

$F_{\text{доп}} = 64 \text{ ksi} (\approx 441.3 \text{ МПа})$ – мінімальна величина між F_{tu} та F_{cy} , обрана з табл. 2.2;

$$k_{\text{оп.кр.}} = 1.33$$

Запас міцності при перевірці перерізу А-А на згин буде дорівнювати:

$$MS_{зг.оп.кр.} = \frac{F_{доп}}{F_{max} \cdot k_{оп.кр.}} - 1 = \frac{64}{8.534 \cdot 1.33} - 1 = 4.64 \quad (3.2.1.1)$$

З'єднання опорного кріплення з рейкою задовольняє перевірку на згин.

3.2.2 Розрахунок на міцність провущин опорного кріплення

Метод аналізу та проектування розміру провущини розглядається як провущини, так і заклепки, що діють разом, оскільки міцність одного може впливати на міцність іншого. Розміри провущин повинні бути консервативними відповідно до їх ваги, яка зазвичай невелика щодо їх важливості, а неточності у виробництві важко контролювати. Цей метод має теоретичну основу, а його обґрунтованість перевірена тестом. Цей метод застосовується лише для алюмінієвих та сталевих сплавів з провущиною подвійного зсуву однорідної товщини, як показано на рис. 3.10, зі статичним навантаженням, прикладеним вздовж осі, поперечно або навкіс (рис. 3.11).[8]

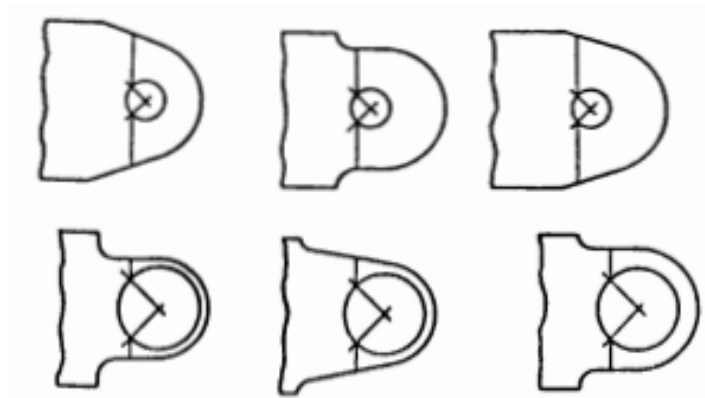


Рисунок 3.10 – Форми провущин

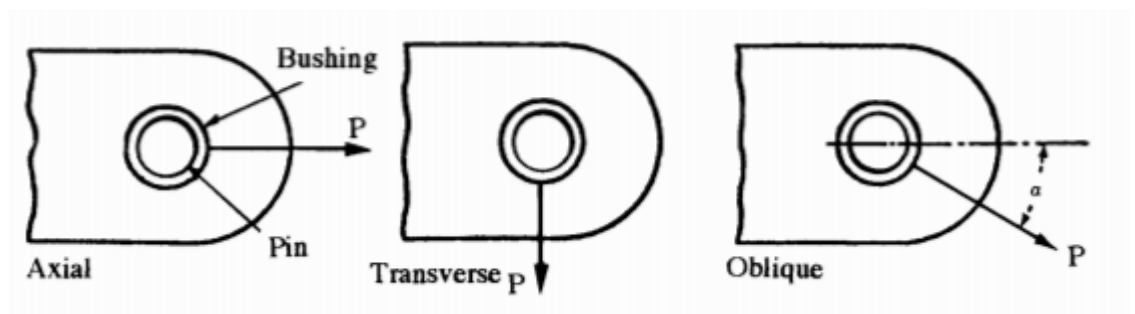


Рисунок 3.11 – Випадки навантаження провущин

Провушина під навантаженням може вийти з ладу в будь-якому з наступних випадків, які описані нижче:

(а) Випадок осьового навантаження ($\alpha = 0^\circ$):

- Вирив і зминання;
- При руйнуванні під час розтягу переріз отвору не може нести рівномірне $\frac{P}{A}$ напруження через ефект концентрації напруження;
- Руйнування в кільцевому напрямку відбувається на кінчику провущини; окремий розрахунок не потрібен, оскільки зріз та зминання подбали про цей тип руйнування;
- Зріз заклепки;
- Руйнування заклепки у випадку згину;
- Надмірна текучість втулки (якщо використовується).

(b) Випадок поперечного навантаження ($\alpha = 90^\circ$):

- Цей випадок може призвести до таких саме видів руйнувань, як і типи руйнувань, перелічені вище;
- Проектування розмірів базується на емпіричних кривих.

(с) Косий випадок навантаження (від 0° до 90°):

- Проектування розмірів базується на рівняннях взаємодії.[8]

Розгляд проектування:

- Більшість застосувань для шарнірних конструкцій використовують симетричні подвійні зсувні провущини або багато зсувні провущини, які використовуються лише в умовах запобігання руйнуванню (див. рис. 3.12);
- Слід використовувати коефіцієнт безпеки для провущин $k_{\text{пров}} = 1.15$ (як границі міцності, так і границі текучості);
- У будь-якому розмірі, якщо задіяні як коефіцієнти безпеки кріплень, так і лиття, застосовується лише більший коефіцієнт;

- При наявності коефіцієнтів, згаданих вище, розмір провушини повинен показувати мінімальний запас міцності 20%;
- Усі необхідні коефіцієнти та мінімальний запас міцності може бути відхилено, якщо випробування було перевірено за допомогою тесту;
- Співвідношення товщини провушини до діаметру отвору ($\frac{t}{D}$) має бути більше 0.3;
- Напрямки зерен (L, LT та ST) матеріалу провушини, як показано на рис. 3.13, повинні бути ретельно орієнтовані, оскільки це впливає на міцність провушини;
- Для поліпшення втомлюваності використовуйте матеріали поковок та пресовані втулки. [8]

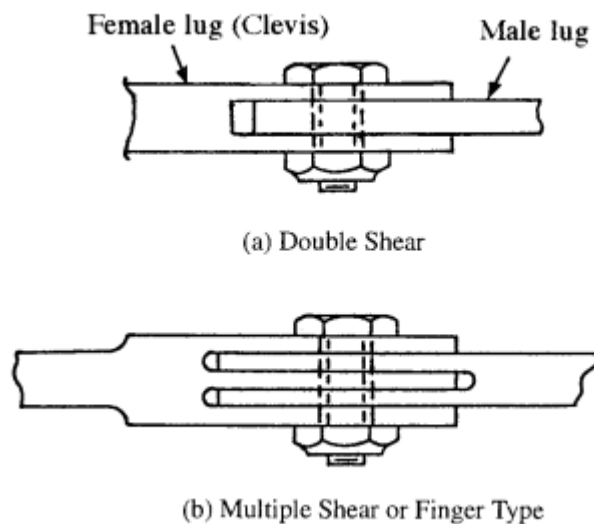


Рисунок 3.12 – Типи провушин

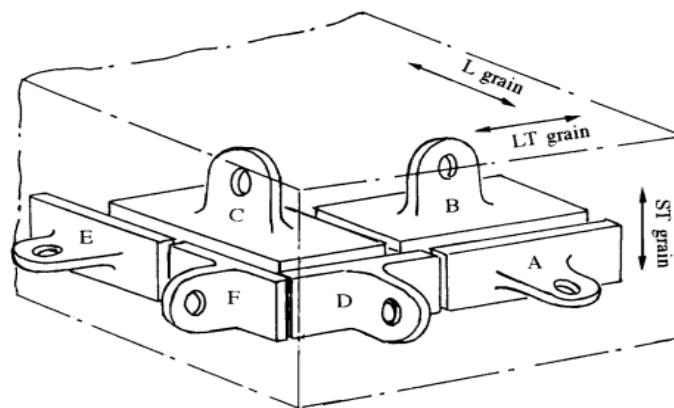


Рисунок 3.13 – Ефект направлення зерен матеріалу

Максимальне навантаження на провушинах для навантаження 9G Вперед зображено на рис. 3.14. З МСЕ отримаємо максимальні навантаження провушин: $P_1 = 473 \text{ lb}$ ($\approx 2104 \text{ H}$); $P_2 = 729 \text{ lb}$ ($\approx 3243 \text{ H}$). Максимальні навантаження провушин 1 і 2, враховуючи коефіцієнт безпеки провушин ($k_{\text{пров}} = 1.33$ [2]), будуть:

$$P_{1u} = P_1 \cdot k_{\text{пров}} = 473 \cdot 1.33 = 629 \text{ lb} (\approx 2798 \text{ H}); \quad (3.2.2.1)$$

$$P_{2u} = P_2 \cdot k_{\text{пров}} = 729 \cdot 1.33 = 970 \text{ lb} (\approx 4315 \text{ H}). \quad (3.2.2.2)$$

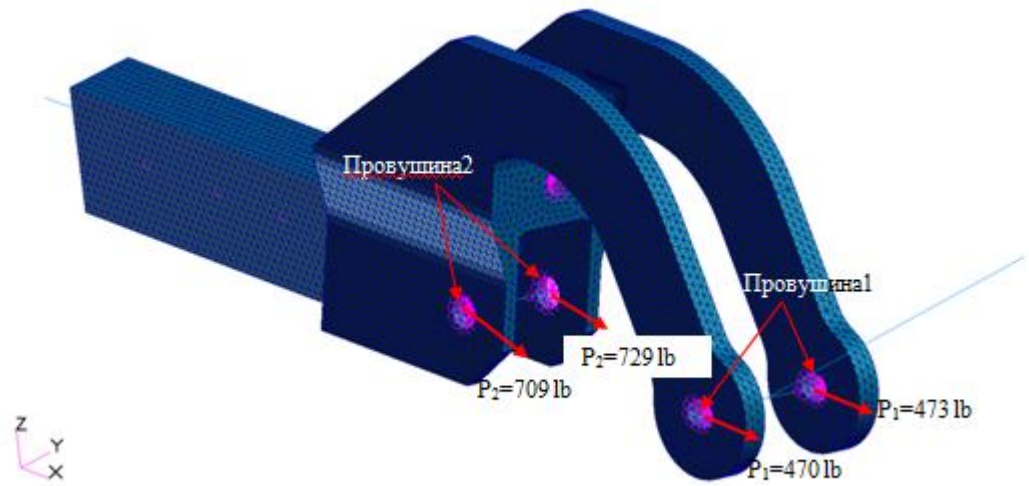


Рисунок 3.14 – Максимальні навантаження провушин при випадку 9G Вперед навантаження

Оскільки отримані максимальні навантаження направлені під кутом α до повздовжньої осі, міцність провушини буде розрахована як міцність провушини з прикладеним косим навантаженням. Міцність від такого навантаження буде дорівнювати сумі а) міцності навантаження вздовж повздовжньої осі та б) міцності навантаження вздовж поперечної осі.

а) При навантаженні вздовж повздовжньої осі може бути два види руйнування провушин: вирив та розтяг, які зображено на рис. 3.15.

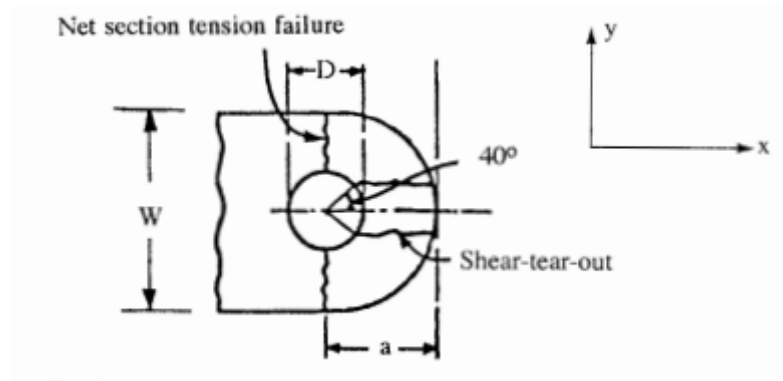


Рисунок 3.15 – Види руйнування провущин при
Випадку 9G Вперед навантаженні

1) Несправність зсуву-зминання:

Руйнування полягає у вириванні провущини вздовж кута 40° з обох боків заклепки (див. рис. 3.15) під час зминання передбачається подрібнення провущини зминанням від заклепки.

Допустиме навантаження для цього типу руйнування задається рівнянням:

$$P_{bru} = k_{br} \cdot F_{tux} \cdot A_{br} \quad (3.2.2.3)$$

де P_{bru} – максимально допустиме навантаження виривання та зминання;

k_{br} – коефіцієнт ефективності зсуву-зминання, який визначається за рис. 3.16;

F_{tux} – максимально допустиме напруження в напрямку x;

A_{br} – проектована площа зминання ($A_{br} = \frac{D}{t}$);

D – діаметр заклепки або зовнішній діаметр отвору втулки (якщо використовується втулка);

t – товщина провущини.

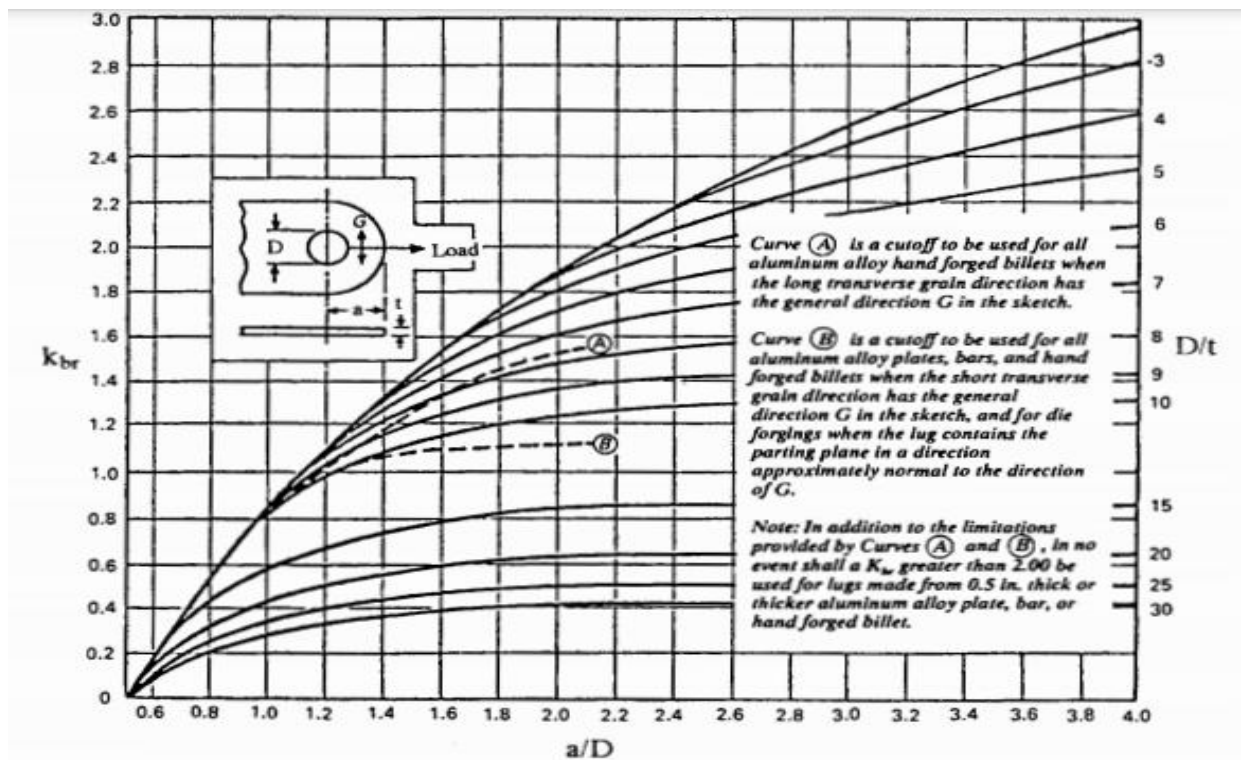


Рисунок 3.16 – Коефіцієнт ефективності зсуву-зминання, $k_{зм}$

2) Несправність при розтягу:

Допустиме навантаження руйнування при розтягу задається рівнянням:

$$P_{tu} = k_t \cdot F_{tux} \cdot A_t, \quad (3.2.2.4)$$

де P_{tu} – допустиме навантаження на розтяг;

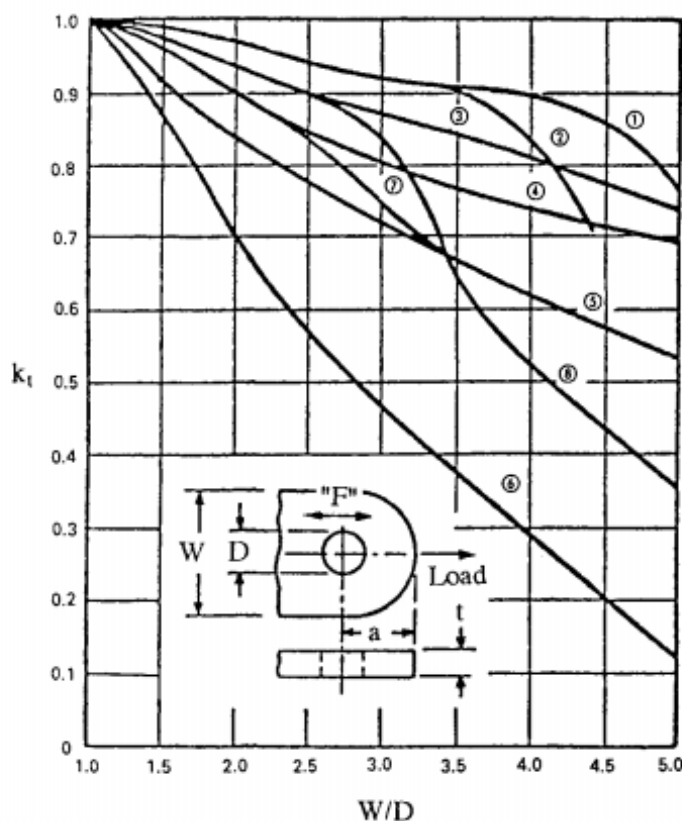
k_t – коефіцієнт ефективності при розтягу, який визначається за рис.

3.17;

F_{tux} – допустиме напруження розтягу в напрямку x;

A_t – мінімальна площа нетто для розтягу ($A_t = (W-D) \cdot t$);

W – ширина провущини.



Legend L, LT and ST indicate grain in direction F in sketch:

Aluminum designation:

14S-2014

24S-2024

75S-7075

Curve ①

4130 steel

14S-T6 and 75S-T6 plate ≤ 0.5 in (L, LT)

75S-T6 bar and extrusion (L)

14S-T6 hand forged billet ≤ 144 sq in (L)

14S-T6 and 75S-T6 die forgings (L)

Curve ②

14S-T6 and 75S-T6 plate > 0.5 in, ≤ 1 in

75S-T6 extrusion (LT, ST)

75S-T6 hand forged billet ≤ 36 sq in (L)

14S-T6 hand forged billet > 144 sq in (L)

14S-T6 hand forged billet ≤ 36 sq in (LT)

14S-T6 and 75S-T6 die forgings (LT)

Curve ③

24S-T6 plate (L, LT)

24S-T4 and 24S-T42 extrusion (L, LT)

Curve ④

24S-T4 plate (L, LT)

24S-T3 plate (L, LT)

14S-T6 and 75S-T6 plate > 1 in (L, LT)

24S-T4 bar (L, LT)

75S-T6 hand forged billet > 36 sq in (L)

75S-T6 hand forged billet ≤ 16 sq in (LT)

Curve ⑤

75S-T6 hand forged billet > 16 sq in (LT)

14S-T6 hand forged billet > 36 sq in (LT)

Curve ⑥

Aluminum alloy plate, bar, hand forged billet, and die forging (ST)

75S-T6 bar (LT)

Curve ⑦

18-8 stainless steel, annealed

Curve ⑧

18-8 stainless steel, full hard. Note: for $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$ and $\frac{3}{4}$ hard, interpolate between Curves ⑦ and ⑧

Рисунок 3.17 – Коефіцієнт ефективності розтягу, k_t

3) Руйнування провущини при текучості:

Допустиме навантаження текучості провущини, пов'язане зі зсувом-зминанням, визначається за формулою:

$$P_y = C \cdot \left(\frac{F_{tyx}}{F_{tux}} \right) \cdot (P_u)_{\min}, \quad (3.2.2.5)$$

де P_y – допустиме навантаження текучості;

C – коефіцієнт текучості, який визначається за рис. 3.18;

F_{tyx} – допустиме напруження текучості розтягу в напрямку x ;

F_{tux} – допустиме напруження міцності розтягу в напрямку x ;

$(P_u)_{\min}$ – менша з величин P_{bru} і P_{tu} [8].

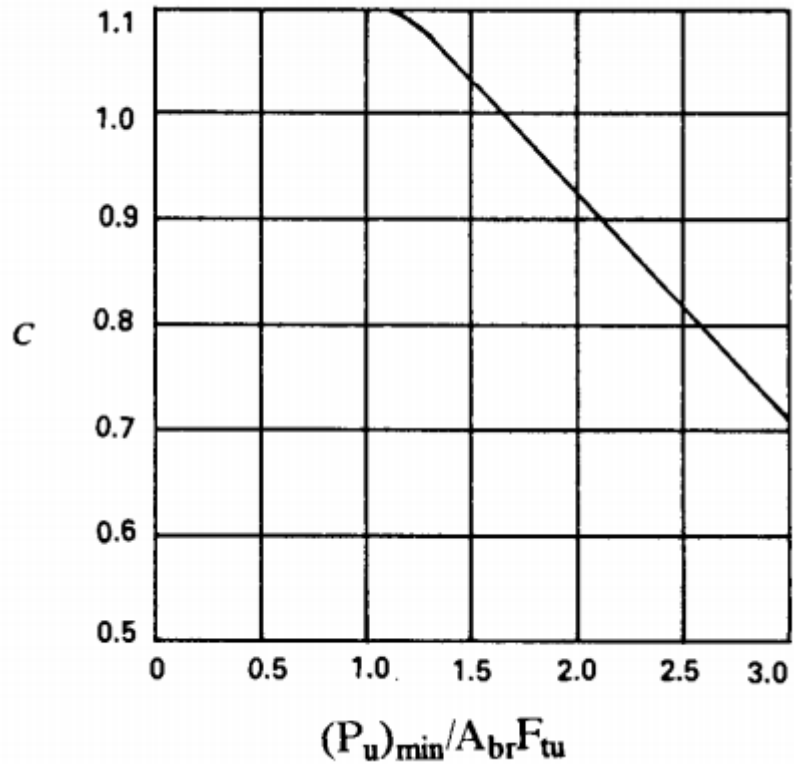


Рисунок 3.18 – Коефіцієнт текучості, C

б) При навантаженні вздовж поперечної осі може бути руйнування провухини: виривання частини провухини, типи якої зображено на рис. 3.19.

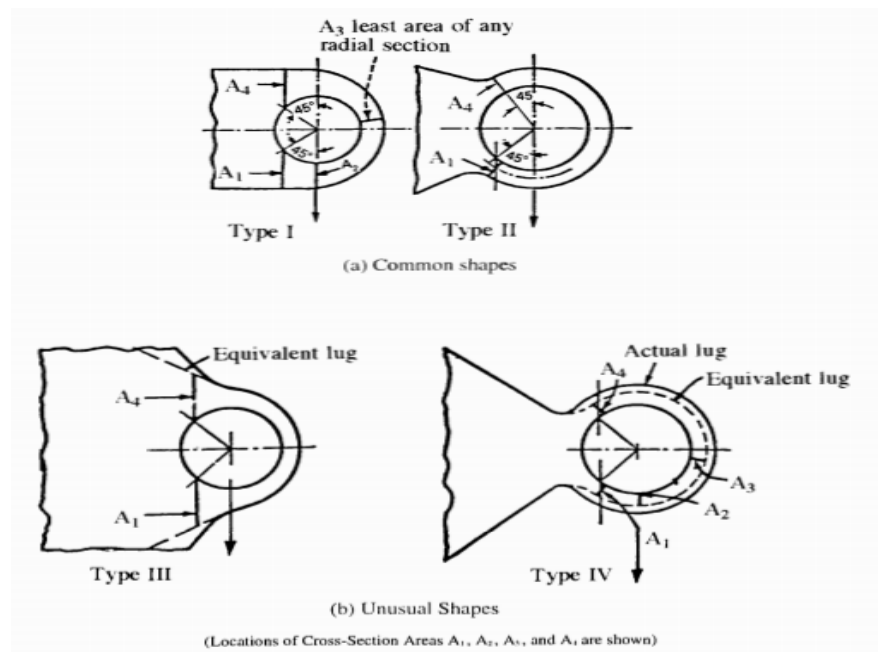


Рисунок 3.19 – Провухини, підвернені поперечному навантаженню

1) Розрахуємо:

$$A_{br} = D \cdot t;$$

$$A_{av} = \frac{6}{\frac{3}{A_1} + \frac{1}{A_2} + \frac{1}{A_3} + \frac{1}{A_4}}$$

2) Допустиме навантаження міцності провущини:

$$P_{tru} = k_{tru} \cdot A_{br} \cdot F_{tuy}, \quad (3.2.2.6)$$

де P_{tru} – допустиме поперечне навантаження міцності;

k_{tru} – коефіцієнт ефективності для допустимого поперечного навантаження міцності, який визначається за рис. 3.20;

A_{br} – проектована площа зминання;

F_{tuy} – допустиме напруження міцності розтягу провущини в напрямку у.

Навантаження, яке може бути перенесено дією консольної балки, вказується дуже приблизно за кривою А на рис. 3.20; якщо коефіцієнт ефективності опускається нижче кривої А, окремий розрахунок як консольної балки є виправданим, як показано на рис. 3.21. [8]

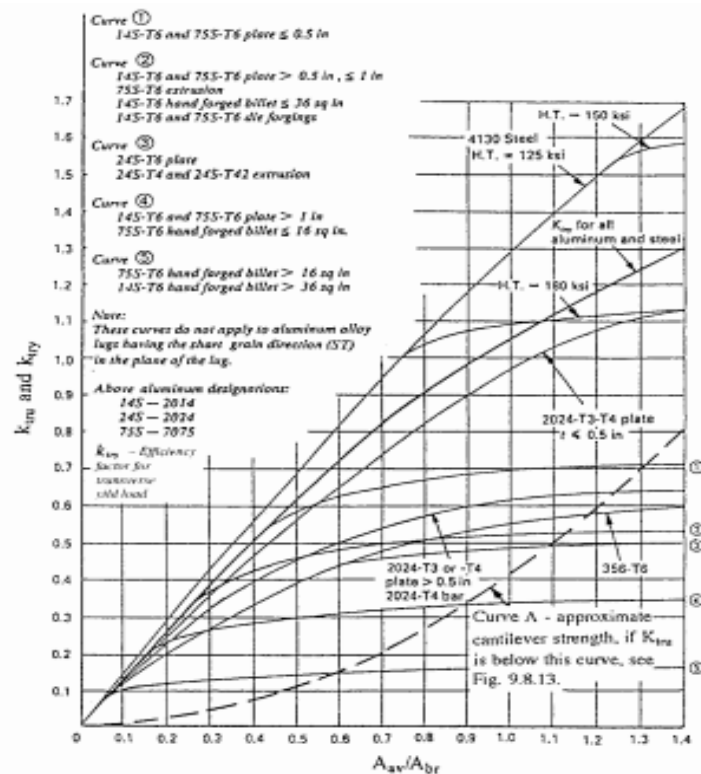


Рисунок 3.20 – Коефіцієнт ефективності для поперечного навантаження, k_{tru} та k_{try}

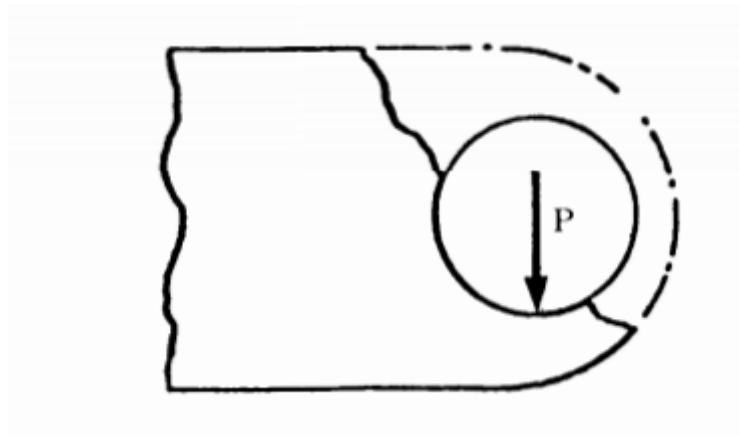


Рисунок 3.21 – Діюча частина балки провущини під поперечним навантаженням

3) Допустиме навантаження текучості провущини:

$$P_{try} = k_{try} \cdot A_{br} \cdot F_{tyy}, \quad (3.2.2.7)$$

де P_{try} – допустиме поперечне навантаження текучості;

k_{try} – коефіцієнт ефективності для допустимого поперечного навантаження текучості, який визначається за рис. 3.20;

A_{br} – проектована площа зминання;

F_{tyy} – допустиме напруження текучості розтягу провущини в напрямку у. [8]

в) Використаємо наступні рівняння взаємодії, щоб визначити розмір косого навантаження, як показано на рис. 3.22.

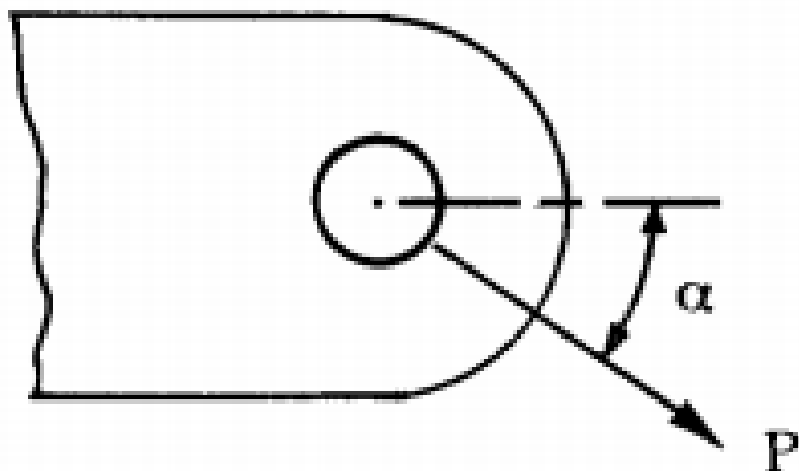


Рисунок 3.22 – Випадок косого навантаження

1) Запас міцності за навантаженням міцності:

$$MS = \frac{1}{(R_{a,u}^{1.6} + R_{tr,u}^{1.6})^{0.625}} - 1, \quad (3.2.2.8)$$

де $R_{a,u}$ – повздовжня складова ($\alpha = 0^\circ$) допустимого навантаження міцності, яке являється меншою величиною між P_{bru} та P_{tu} ;

$R_{tr,u}$ – поперечна складова ($\alpha = 90^\circ$) допустимого навантаження міцності, яке дорівнює P_{tru} .

2) Запас міцності за навантаженням текучості:

$$MS = \frac{1}{(R_{a,y}^{1.6} + R_{tr,y}^{1.6})^{0.625}} - 1, \quad (3.2.2.9)$$

де $R_{a,y}$ – повздовжня складова ($\alpha = 0^\circ$) допустимого навантаження текучості, яке дорівнює P_y ;

$R_{tr,u}$ – поперечна складова ($\alpha = 90^\circ$) допустимого навантаження текучості, яке дорівнює P_y . [8]

На рисунках 3.23 та 3.24 показано аналіз статичного напруження для опорного кріплення із використанням стандартної провущини.

Loading

Pu = 629 lb
Py = 0 lb
theta = 45.0 deg

Geometry

e = 0.700 in
D = 0.500 in
t = 0.270 in
W = 1.000 in

Idealized Geometry

W_ax = 1.000 in
e_ax = 0.700 in
t_eff = 0.270 in

Strength Factors

Define strength factors by = Selecting Material ☒ Use recommended fitting factors for D6 Section 4 analysis

material = ALUMINUM
series = 7000
alloy = 7050
temper = T7451
form = PLATE
restriction = 0.25 <= ts <= 8.5

Kaxusrc = D6, Fig. 3-2
KDt = 0.977
Knt = 0.920
Ksb = 0.920
Kaxu = 0.899
Kaxy = 0.831
grain = 3

Ktrusrc = D6, Fig. 3-3
KDt2 = 1.000
Ktru = 0.597
Ctry = 0.814
ts = 0.270 in

Material Properties

Ftuax = 75000 psi
Ftyax = 66000 psi
Elongax = 9.0 %
Fbru = 100000 psi (for e/D=1.5)
pin = Wet

Ftutr = 72000 psi
Ftytr = 61000 psi
Elongtr = 3.0 %
E = 10300000 psi

Calculate Yield Strength

Paxy = 7403 lb
Ptry = 4001 lb
Kthetay = 0.627
Pthetay = 4640 lb
D6Sec4ffy = 1.00
FFy = 1.00
MSy = UNDEF

Calculate Ultimate Strength

Paxu = 9105 lb
Ptru = 5802 lb
Kthetau = 0.703
Pthetau = 6405 lb
D6Sec4fu = 1.00
FFu = 1.00
MSu = 9.18

Рисунок 3.23 – Аналіз міцності провущини 1 при випадку 9G Вперед навантаженні

Запас міцності провущини 1:

$$MS_{np1} = MS_u = 9.18 \quad (3.2.2.10)$$

Провущина 1 задовольняє перевірку на міцність.

Loading

Pu = 970 lb
Py = 0 lb
theta = 10.0 deg

Geometry

e = 0.610 in
D = 0.375 in
t = 0.160 in
W = 0.815 in

$eod = \frac{e}{D} = 1.627$
 $Wod = \frac{W}{D} = 2.173$
 $Dot = \frac{D}{t} = 2.344$

Idealized Geometry

W_ax = 0.815 in
e_ax = 0.610 in
t_eff = 0.160 in

W_tr = 0.815 in
e_tr = 0.610 in

Strength Factors

Define strength factors by = Selecting Material ☒ Use recommended fitting factors for D6 Section 4 analysis

material = ALUMINUM
series = 7000
alloy = 7050
temper = T7451
form = PLATE
restriction = 0.25 <= ts <= 8.5

Kaxusrc = D6, Sect 4
KDt = 0.988
Knt = 0.908
Ksb = 0.991
Kaxu = 0.897
Kaxy = 0.968
grain = 3

Ktrusrc = D6, Sect 4
KDt2 = 1.000
Ktru = 0.476
Ctry = 0.809
ts = 0.160 in

Material Properties

Ftuax = 75000 psi
Ftyax = 66000 psi
Elongax = 9.0 %
Fbru = 100000 psi (for e/D=1.5)
pin = Wet

Ftutr = 72000 psi
Ftytr = 61000 psi
Elongtr = 3.0 %
E = 10300000 psi

Calculate Yield Strength

Paxy = 3835 lb
Ptry = 1410 lb
Kthetay = 0.858
Pthetay = 3292 lb
D6Sec4ffy = 1.15
FFy = 1.00
MSy = UNDEF

Calculate Ultimate Strength

Paxu = 4735 lb
Ptru = 2057 lb
Kthetau = 0.889
Pthetau = 4211 lb
D6Sec4ffu = 1.15
FFu = 1.00
MSu = 2.77

Orthogonal lug positions relative to nominal grain directions are shown below.
Grain Directions
L - Longitudinal
LT - Long Transverse
ST - Short Transverse

If beta > 0 define W indirectly, see HELP

Рисунок 3.24 – Аналіз міцності провущини 2 при випадку
9G Вперед навантаженні

Запас міцності провущини 2:

$$MS_{np2} = MS_u = 2.77 \quad (3.2.2.11)$$

Провущина 2 задовольняє перевірку на міцність.

3.2.3 Розрахунок на міцність заклепок опорного кріплення

Оскільки отримані максимальні навантаження направлені вздовж косої осі, може бути два види руйнування заклепки: зріз та вигин заклепки.

1) Зріз заклепки:

Допустиме навантаження зрізу заклепки задається рівнянням:

$$P_{p,s} = F_{su} \cdot \left(\frac{\pi \cdot D^2}{4} \right), \quad (3.2.3.1)$$

де $P_{p,s}$ – допустиме навантаження заклепки на зріз;

F_{su} – допустиме напруження заклепки на зріз.

У більшості випадків проектування, провущина проектується на подвійний зріз:

$$P_{p,s} = 2F_{su} \cdot \left(\frac{\pi \cdot D^2}{4} \right) \quad (3.2.3.2)$$

або $P_{p,s} = 2P_{s,all}$,

де $P_{s,all}$ – допустиме навантаження зрізу, яке визначається за рис. 3.25. [8]

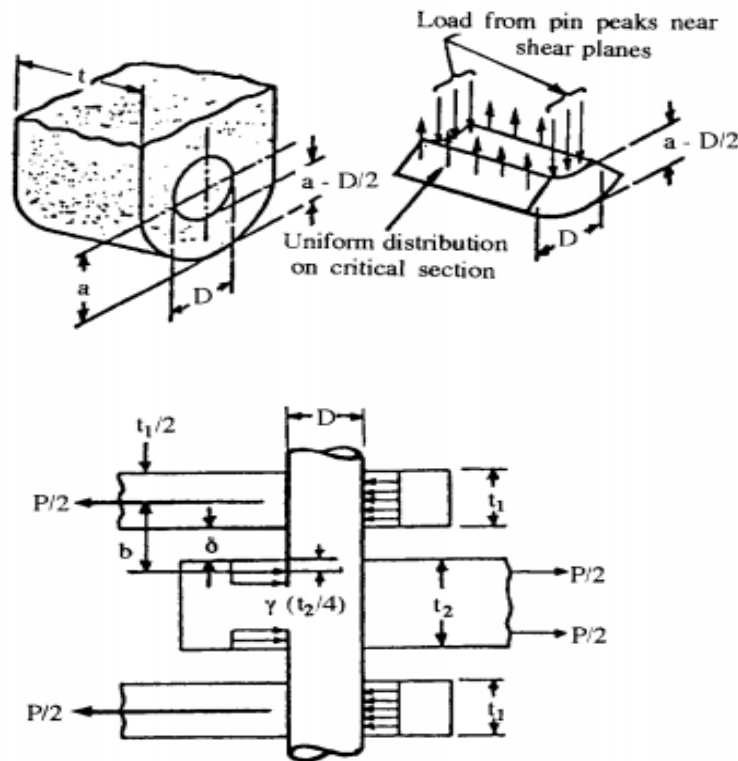


Рисунок 3.25 – Плече моменту для визначення згинаючого моменту заклепки

2) Вигин заклепки:

Якщо заклепка, що використовується в провушині, занадто мала, то заклепка може зігнутися настільки, щоб зруйнувати провушину, оскільки, коли заклепка згинається, розподіл напружень, що діє на внутрішній стороні провушини має тенденцію до піку, а не до рівномірного розподілу, як показано на рис. 3.26.

Оскільки слабка або мала заклепка може призвести до виходу з ладу внутрішнього провушину (t_2) при меншому навантаженні, завжди рекомендуються більші заклепки (із достатнім MS). Плече моменту задається формулою:

$$b = \frac{t_1}{2} + \delta + \gamma \cdot \left(\frac{t^2}{4}\right); \quad (3.2.3.3)$$

Розрахуємо наступні дві величини:

$$\frac{(P_u)_{min}}{A_{br} \cdot F_{tux}};$$
$$r = \frac{a - \frac{D}{2}}{t_2},$$

де t_1 – товщина зовнішньої провушини;

t_2 – товщина внутрішньої провушини;

$(P_u)_{min}$ – менша величина між P_{tux} та P_{tu} ;

P_{tux} – матеріал провушини перетинає зерно “F” (див. рис. 3.16);

D – діаметр заклепки;

δ – фаска провушини (як зображено на рис. 3.26);

γ – понижуючий коефіцієнт, який визначається за рис. 3.27

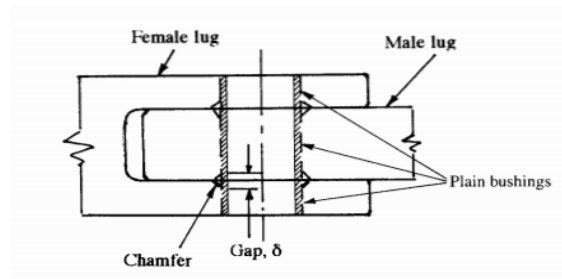


Рисунок 3.26 – Фаска провушини, δ

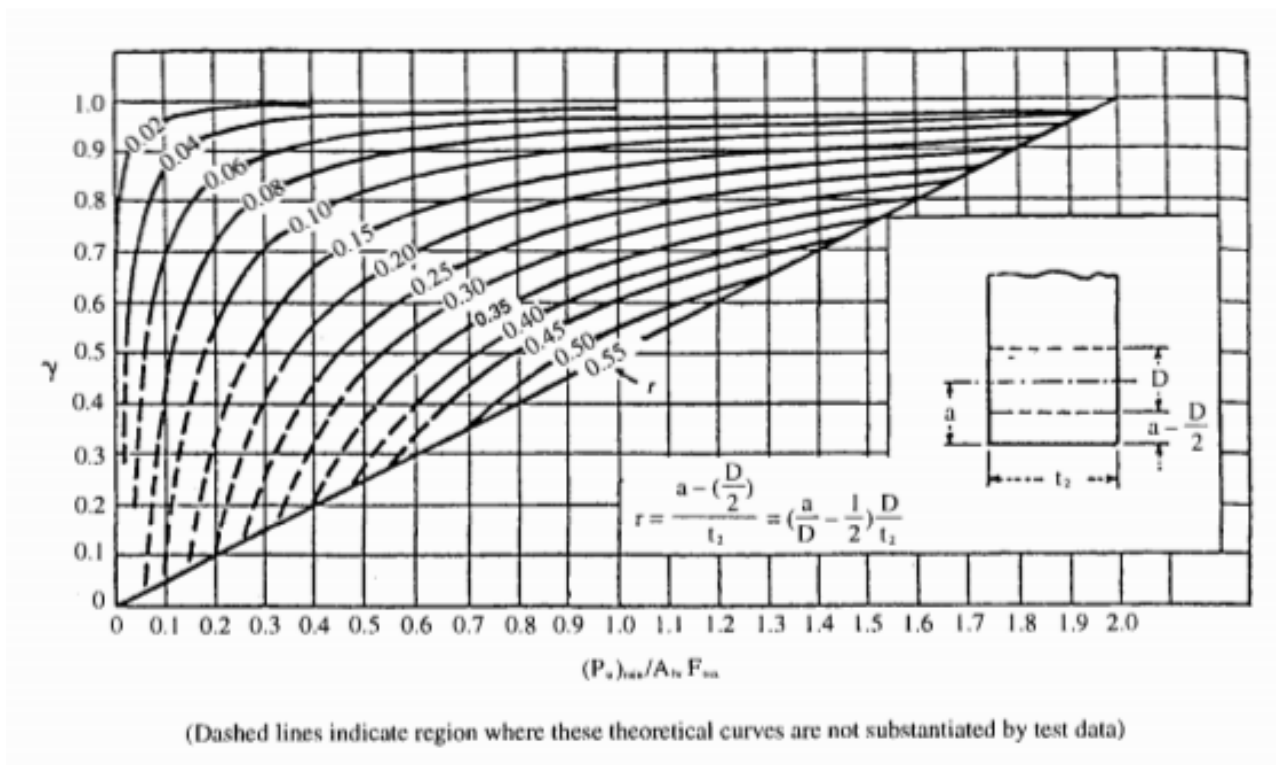


Рисунок 3.27 – Понижуючий коефіцієнт, γ

Згинаючий момент заклепки, $M = \frac{P}{2} b$

$$MS = \frac{\text{Допустимий згинаючий момент}}{\lambda \cdot M} - 1, \quad (3.2.3.4)$$

де λ – коефіцієнт безпеки кріплення. [8]

У нашому з'єднанні провушини використовуються титанові та сталеві заклепки.

Матеріал заклепки:

- Провушина 1: Титанова заклепка – Ti-6Al-4V, $F_{su} = 95 \text{ ksi}$ ($\approx 655 \text{ МПа}$);

- Провушина 2: Сталева заклепка – 17-4PH, $F_{su} = 95 \text{ ksi}$ ($\approx 655 \text{ МПа}$).

Максимально допустимі граничні значення статичних напружень для зсувного навантаження обох типів заклепок були розраховані із застосуванням стандартних рівнянь для заклепок працюючих тільки на зріз. Результати аналізу показані на рисунках 3.28 та 3.29.

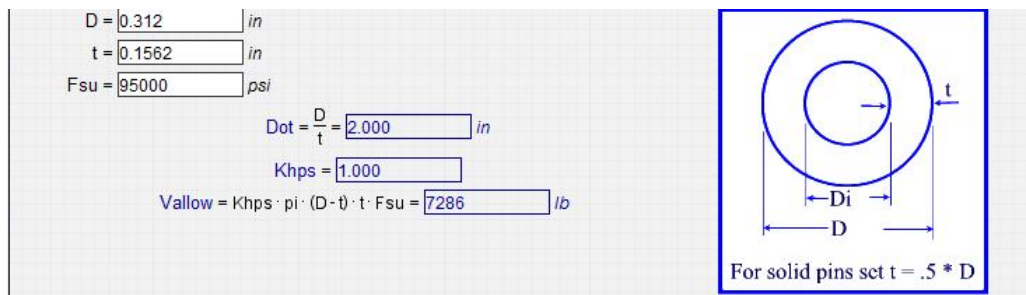


Рисунок 3.28 – Допустиме навантаження на зріз
для титанової заклепки

Допустиме навантаження на зріз:

$$V_{allow} = 7286 \text{ lb } (\approx 32410 \text{ N}).$$

Запас міцності титанової заклепки 1:

$$MS_{T3} = \frac{V_{allow}}{P_{u1}} - 1 = \frac{7286}{629} - 1 = 10.58 \quad (3.2.3.5)$$

Титанова заклепка 1 задовольняє перевірку на міцність.

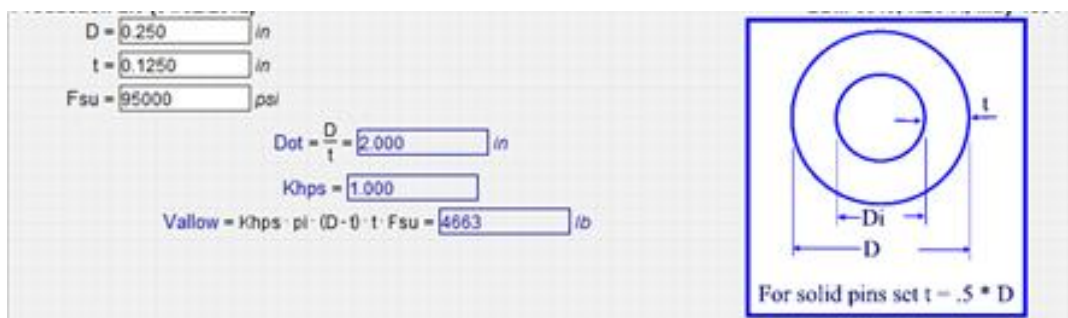


Рисунок 3.29 – Допустиме навантаження на зріз
для сталевोї заклепки

Допустиме навантаження на зріз:

$$V_{allow} = 4663 \text{ lb } (\approx 20742 \text{ N}).$$

Запас міцності сталевої заклепки 2:

$$MS_{c3} = \frac{V_{allow}}{P_{u2}} - 1 = \frac{4663}{970} - 1 = 3.80 \quad (3.2.3.6)$$

Сталева заклепка 2 задовольняє перевірку на міцність.

З'єднання між опорним кріпленням та NON-9G Load кріпленням зображено на рис. 3.30.

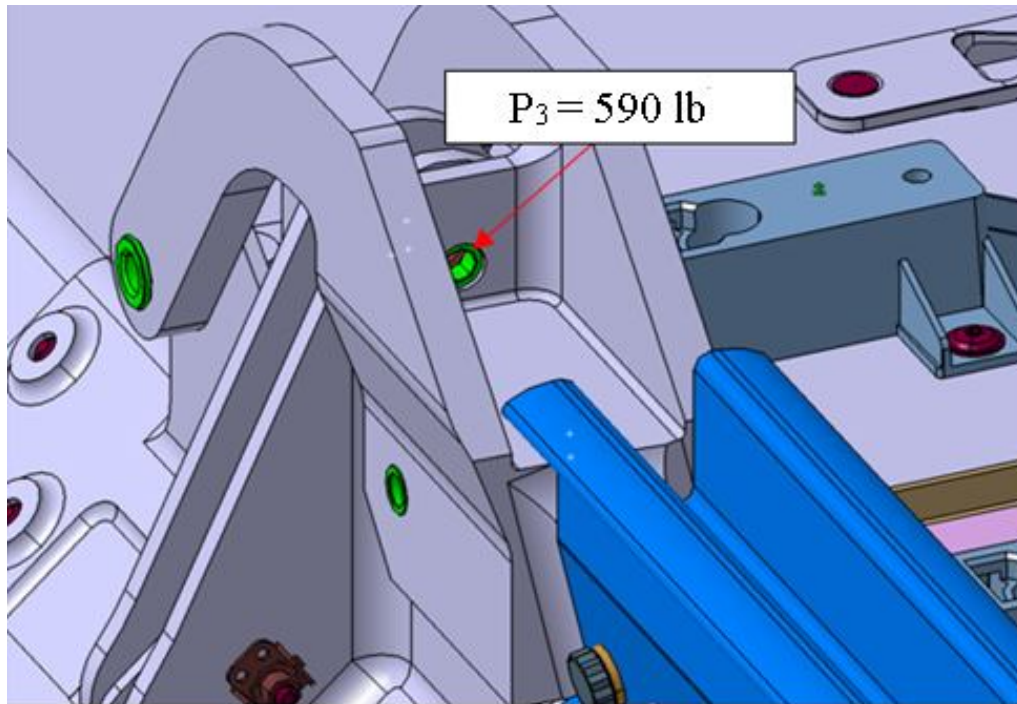


Рисунок 3.30 – Головний вид з'єднання опорного кріплення з NON-9G Load кріпленням

Напруження заклепки 3, визначене за допомогою СЕ-моделі для випадку навантаження 9G Вперед: $P_3 = 590 \text{ lb}$ ($\approx 2624 \text{ Н}$). Максимальне напруження заклепки 3:

$$P_{u3} = P_3 \cdot k_{\text{оп.кр.}} = 590 \cdot 1.33 = 785 \text{ lb} (\approx 3492 \text{ Н}). \quad (3.2.3.7)$$

Запас міцності перевірки на зминання:

Матеріал опорного кріплення: алюмінієвий сплав 7050-T7451 (див. табл.. 2.2, $F_{bru}^{\frac{e}{D}=1.5} = 100000 \text{ psi}$).

Допустиме навантаження на зминання опорного кріплення:

$$P_{bru} = F_{bru}^{\frac{e}{D}=1.5} \cdot t \cdot d = 100000 \cdot 0.2 \cdot 0.3754 = 7508 \text{ lb} (33397 \text{ Н}); \quad (3.2.3.8)$$

$$MS_{br} = \frac{P_{bru}}{P_{u3}} - 1 = \frac{7508}{785} - 1 = 8.56 \quad (3.2.3.9)$$

Опорне кріплення задовольняє перевірку на зминання.

Запас міцності титанової заклепки 3:

Матеріал заклепки 3: Титановий сплав - 6Al-4V, $F_{su} = 95 \text{ ksi}$ ($\approx 655 \text{ МПа}$);

$V_{allow} = 7286 \text{ lb}$ ($\approx 32410 \text{ Н}$) (згідно з рис. 3.28)

$$MS_{T3} = \frac{V_{allow}}{P_{u3}} - 1 = \frac{7286}{785} - 1 = 8.28 \quad (3.2.3.10)$$

Титанова заклепка 3 задовольняє перевірку на міцність.

3.3 Розрахунок на міцність рейок

Рейка моделюється за допомогою PATRAN з використанням bar-елементів, як показано нижче. Навантаження вільного тіла для кожного елемента витягуються, а компоненти навантажувальної оболонки використовуються для аналізу напружень консервативно. Були використані випадки навантаження з табл. 2.3.

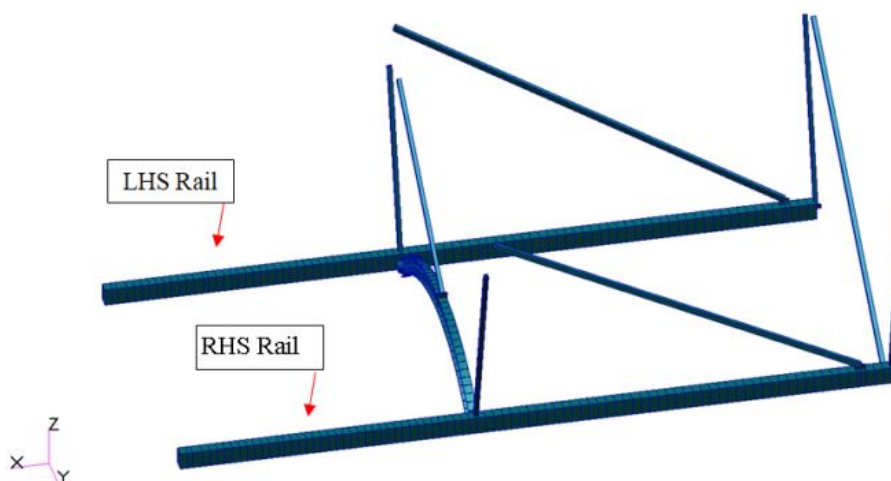


Рисунок 3.31 – Модель рейок у PATRAN

Рейки з постійним перерізом по довжині виготовляються з пластини з алюмінієвого сплаву 7075-T7351 згідно табл. 2.1. На рисунку 3.32 показано загальний вигляд 3D та критичний переріз площі нетто (B-B) для рейок.

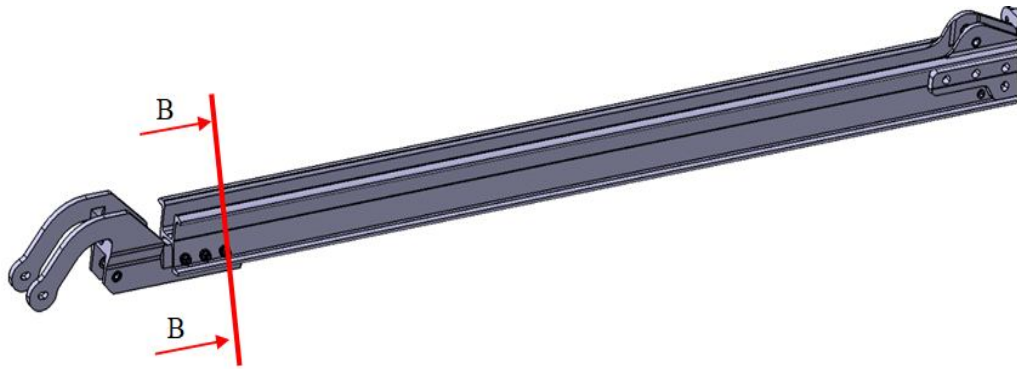


Рисунок 3.32 – Загальний вигляд 3D та критичний переріз площі нетто (В-В) для рейок

Переріз В-В з площею нетто перевірявся на вигин. Див. рис. 3.33, що показує геометричні характеристики перерізу В-В.

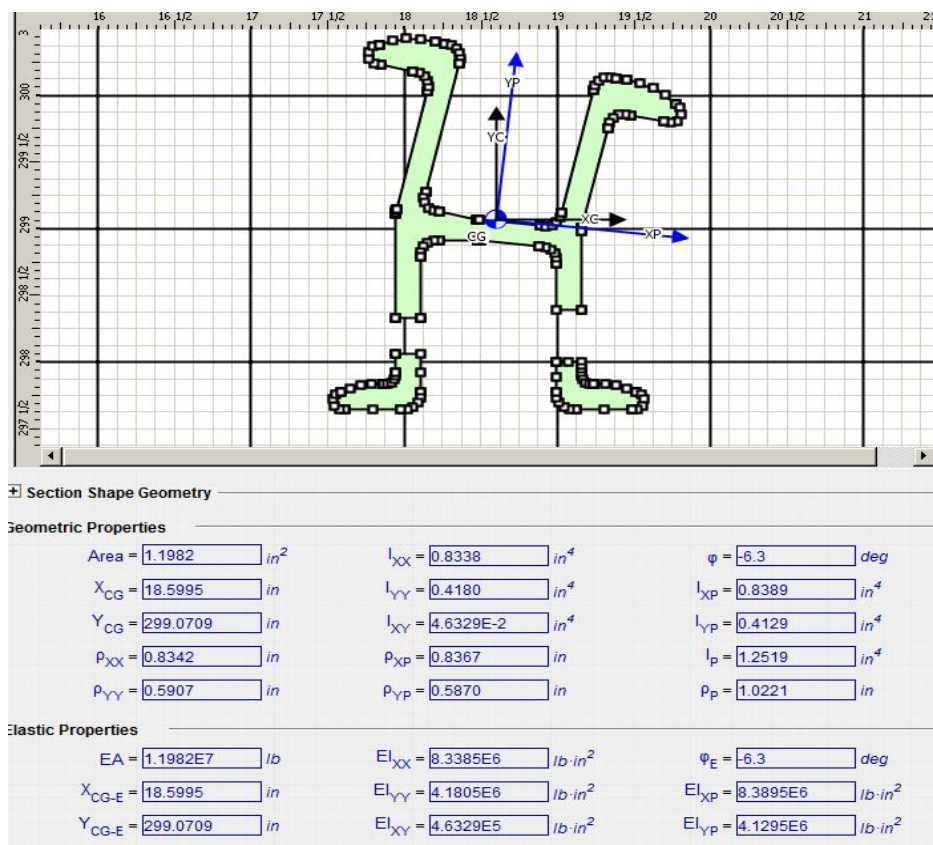


Рисунок 3.33 – Геометричні характеристики перерізу В-В

Навантаження, перелічені нижче (табл. 3.4), є конвертом найбільших навантажень для всіх випадків навантаження вилучених з МСЕ.

Таблиця 3.4 – Максимальні навантаження для рейок

F/M	F _x , lb (H)	F _y , lb (H)	F _z , lb (H)	M _x , in-lb (H·м)	M _y , in-lb (H·м)	M _z , in-lb (H·м)
MAX.	-716 (≈ -3185)	-2415 (≈ -10742)	1795 (≈ 7985)	5843 (≈ 7922)	936 (≈ 1269)	278 (≈ 377)

Розрахунок максимального напруження в поперечному перерізі В-В зображено на рис. 3.34.

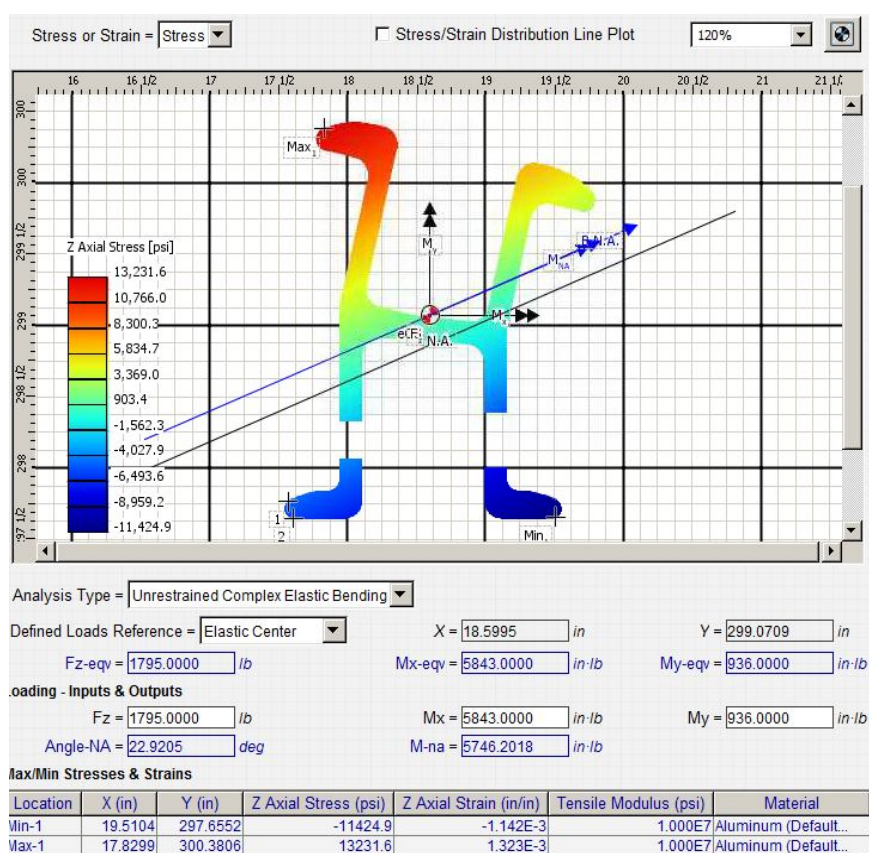


Рисунок 3.34 - Розрахунок максимального напруження в перерізі В-В

Перевірка на складне навантаження (згин та осьове навантаження) перерізу В-В:

$$F_{\max} = 13.23 \text{ ksi } (\approx 91.2 \text{ МПа});$$

$F_{\text{доп}} = 55 \text{ ksi } (\approx 379.2 \text{ МПа})$ – допустиме напруження, мінімальна величина між F_{tu} та F_{cy} , обрана з табл. 2.1;

$$k_p = 1.15 \text{– коефіцієнт безпеки рейки. [2]}$$

Запас міцності при перевірці перерізу В-В на згин буде дорівнювати:

$$MS_p = \frac{F_{\text{доп}}}{F_{\text{max}} \cdot k_{\text{оп.кр.}}} - 1 = \frac{55}{13.23 \cdot 1.15} - 1 = 2.61. \quad (3.3.1)$$

Рейка задовольняє перевірку на згин.

3.3.1 Розрахунок на міцність провущин рейок

Розрахунок на міцність провущин рейок аналогічний до розрахунку провущин опорних кріплень “кіготь”.

Максимальне навантаження на провущинах при навантаженні 9G Вперед зображено на рис. 3.35. З МСЕ отримаємо максимальні навантаження провущин: $P_4 = 2032 \text{ lb}$ ($\approx 9039 \text{ N}$). Максимальне навантаження провущини 4, враховуючи коефіцієнт безпеки провущин ($k_{\text{пров}} = 1.15$ [2]), буде:

$$P_{u4} = P_4 \cdot k_{\text{пров}} = 2032 \cdot 1.15 = 2337 \text{ lb} (\approx 10395 \text{ N}). \quad (3.3.1.1)$$

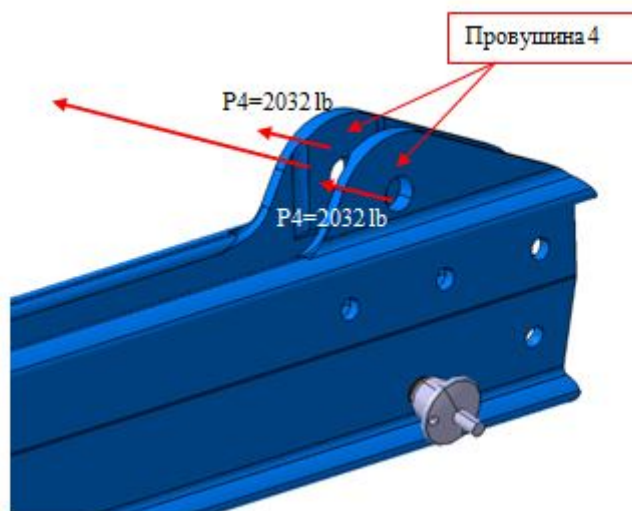


Рисунок 3.35 - Максимальні навантаження провущин при випадку 9G Вперед навантаження

На рисунку 3.36 показано аналіз статичного напруження для рейки із використанням стандартної провущини.

Loading

Pu = 2337 lb
Py = 0 lb
theta = 45.0 deg

Geometry

e = 0.751 in
D = 0.438 in
t = 0.230 in
W = 2.000 in

$eod = \frac{e}{D} = 1.715$
 $Wod = \frac{W}{D} = 4.568$
 $Dot = \frac{D}{t} = 1.903$

Idealized Geometry

W_ax = 2.000 in
e_ax = 0.751 in
t_eff = 0.230 in

W_tr = 1.532 in
e_tr = 0.751 in

Strength Factors

Define strength factors by = ☒ Use recommended fitting factors for D6 Section 4 analysis

material =
series =
alloy =
temper =
form =
restriction =

Kaxusrc =
KDt =
Knt =
Ksb =
Kaxu =
Kaxy =
grain =

Ktrusrc =
KDt2 =
Ktru =
Ctry =
ts =

Material Properties

Ftuax = psi
Ftyax = psi
Elongax = %
Fbru = psi (for e/D=1.5)
pin =

Ftutr = psi
Ftytr = psi
Elongtr = %
E = psi

Calculate Yield Strength

Paxy = lb
Ptry = lb
Kthetay =
Pthetay = lb
D6Sec4ffy =
FFy =
MSy =

Calculate Ultimate Strength

Paxu = lb
Ptru = lb
Kthetau =
Pthetau = lb
D6Sec4ffu =
FFu =
MSu =

Orthogonal lug positions relative to nominal grain directions are shown below.
Grain Directions
L - Longitudinal
LT - Long Transverse
ST - Short Transverse

If beta > 0 define W indirectly, see HELP

Рисунок 3.36 – Аналіз міцності провушини 4 при випадку
9G Вперед навантаженні

Запас міцності провушини 4:

$$MS_{пр4} = MS_u = 2.16 \quad (3.3.1.2)$$

Провушина 4 задовольняє перевірку на міцність.

3.3.2 Розрахунок на міцність заклепок рейок

Розрахунок на міцність заклепок рейок аналогічний до розрахунку заклепок опорних кріплень “кіготь”.

Максимальні навантаження при навантаженні 9G Вперед на заклепках 4 і 5: $P_{u4} = 2337 \text{ lb}$ ($\approx 10395 \text{ H}$); $P_{u5} = 513 \text{ lb}$ ($\approx 2282 \text{ H}$) (отримано з СЕ-моделі). На рис. 3.37 зображено головний вид 3D встановлення заклепок в рейках.

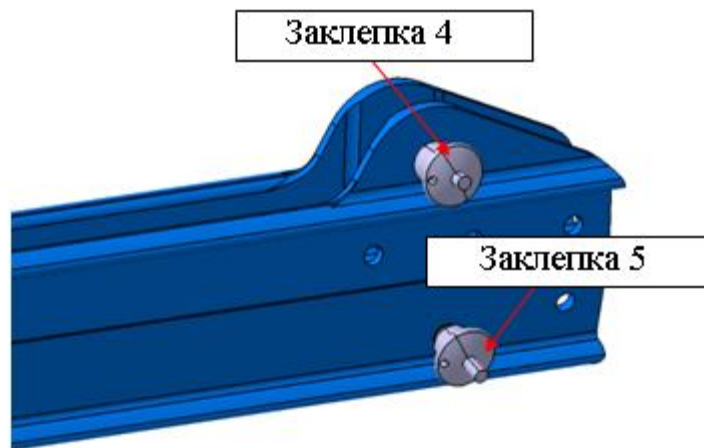


Рисунок 3.37 – Головний вид 3D встановлення заклепок в рейках

Запас міцності титанової заклепки 5:

Матеріал заклепки 5: Титановий сплав - 6Al-4V, $F_{su} = 95 \text{ ksi}$ ($\approx 655 \text{ МПа}$);

$V_{allow} = 7286 \text{ lb}$ ($\approx 32410 \text{ H}$) (згідно з рис. 3.28);

Консервативно приймемо: $P_{u5} = P_{u4} = 2337 \text{ lb}$ ($\approx 10395 \text{ H}$);

$$MS_{T3} = \frac{V_{allow}}{P_{u5}} - 1 = \frac{7286}{2337} - 1 = 2.12 \quad (3.3.2.1)$$

Титанова заклепка 5 задовольняє перевірку на міцність.

Запас міцності на зминання рейки (для заклепки 5):

Матеріал рейки: алюмінієвий сплав 7075-T7351 (див. табл. 2.1,

$$F_{bru}^{\frac{e}{D}=1.5} = 96000 \text{ psi}).$$

Допустиме навантаження на зминання опорного кріплення:

$$P_{bru} = F_{bru}^{\frac{e}{D}=1.5} \cdot t \cdot d = 96000 \cdot 0.16 \cdot 0.3753 = 5765 \text{ lb } (\approx 25644 \text{ Н}); \quad (3.3.2.2)$$

$$MS_{br} = \frac{P_{bru}}{P_{u5}} - 1 = \frac{5765}{513} - 1 = 10.24 \quad (3.3.2.3)$$

Рейка задовольняє перевірку на зминання.

3.4 Розрахунок рейки на зминання та болтів на зріз

3.4.1 З'єднання рейки з опорним кріпленням “кіготь”

3D схема кріплення рейки до опорного кріплення “кіготь” за допомогою болтів зображено на рис. 3.38.

Вихідні розміри елементів проектування:

Діаметр болтів – $d = 0.25 \text{ in } (\approx 6.35 \text{ мм})$;

Матеріал болтів – алюмінієвий сплав 718 ($F_{su} = 119 \text{ ksi } (\approx 820.5 \text{ МПа})$);

Допустиме навантаження зрізу болта:

$$P_{ss} = F_{su} \cdot \left(\frac{\pi \cdot d^2}{4}\right) = 119 \cdot 0.0491 = 5841 \text{ lbs } (\approx 25982 \text{ Н}). \quad (3.4.1.1)$$

Товщина рейки – $t = 0.16 \text{ in } (\approx 4.06 \text{ мм})$;

Діаметри отворів рейки – $d_p = 0.2685 \text{ in } (\approx 6.82 \text{ мм})$;

Матеріал рейки – алюмінієвий сплав 7075-T7351 (табл. 2.1);

Допустиме напруження зминання - $F_{bru}^{\frac{e}{D}=1.5} = 96000 \text{ psi } (\approx 661896 \text{ Па})$.

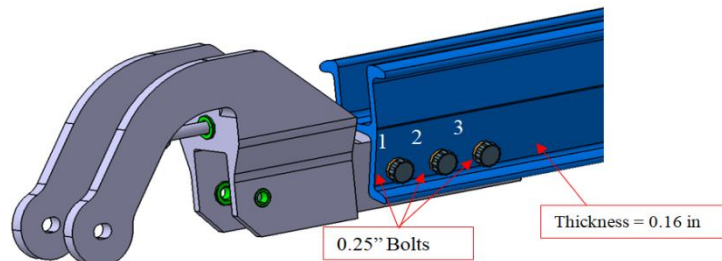


Рисунок 3.38 – 3D схема кріплення рейки до опорного кріплення “кіготь” за допомогою болтів

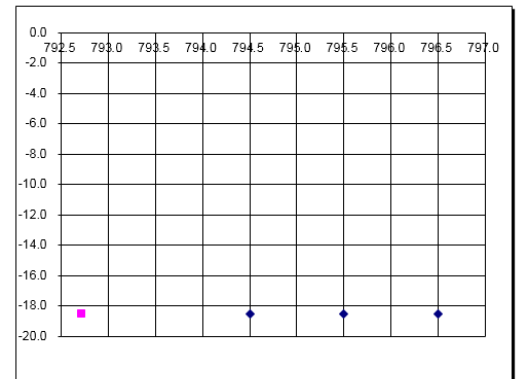
Перелічені нижче навантаження (рис. 3.39) є огинаючою найбільших навантажень для всіх випадків навантаження (від МСК). Навантаження з СЕ-моделі застосовуються для 3D зваженого аналізу групи болтів. Болт №3 переносить найбільше навантаження, визначене цією електронною таблицею (див. рис. 3.39).

3-D WEIGHTED FASTENER PATTERN ANALYSIS

Applied Loads									
Forces				Moments			Loads Coordinates		
1 Load #	2 Fx (lb)	3 Fy (lb)	4 Fz (lb)	5 Mx (lb-in)	6 My (lb-in)	7 Mz (lb-in)	8 Xi (in)	9 Yi (in)	10 Zi (in)
1	1394	-40	125	19	1331	421	792.70	-18.55	298.07
3									

Section Properties				Resultant loads about centroid			
X xz : 795.500				lx : 0.000			
X xy : 795.500				ly : 2.000			
Y xy : -18.550				lz : 2.000			
Y yz : -18.550				Fy : 1394			
Z xz : 298.200				Fz : 125			
Z yz : 298.200				Mx : 14			
				My : 1500			
				Mz : 533			

Notes:



11 Fast-ener	12 X (in)	13 Y (in)	14 Z (in)	15 Ax	16 Ay	17 Az	18 Px (lb)	19 Py (lb)	20 Pz (lb)	21 P (lb)
1	796.50	-18.55	298.20	1.000	1.000	1.000	465	253	-708	884
2	795.50	-18.55	298.20	1.000	1.000	1.000	465	-13	42	467
3	794.50	-18.55	298.20	1.000	1.000	1.000	465	-280	792	960

Рисунок 3.39 – 3D зважений аналіз групи болтів

Діюче зрізне навантаження на болт №3:

$$P_3 = \sqrt{P_{3x}^2 + P_{3z}^2} \cdot k_p = \sqrt{465^2 + 792^2} \cdot 1.15 = 1056 \text{ lbs} (\approx 4697 \text{ H}). \quad (3.4.1.2)$$

Допустиме навантаження зминання рейки болтом №3:

$$P_{br} = F_{bru}^D \cdot t \cdot d_p = 96000 \cdot 0.16 \cdot 0.2685 = 4124 \text{ lbs} (\approx 18344 \text{ H}). \quad (3.4.1.3)$$

Допускаємо, що болти працюють тільки на зріз.

Запас міцності рейки на зминання (від болта №3):

$$MS_{br} = \frac{P_{br}}{P_3} - 1 = \frac{4124}{1056} - 1 = 2.9. \quad (3.4.1.4)$$

Рейка задовольняє перевірку на зминання.

Запас міцності болта №3 на зріз:

$$MS_{ss} = \frac{P_{ss}}{P_3} - 1 = \frac{5841}{1056} - 1 = 4.53. \quad (3.4.1.1)$$

Болт №3 задовольняє перевірку на зминання.

3.4.2 З'єднання рейки зі зрощенням

3D схема кріплення рейки до зрощення за допомогою болтів зображено на рис. 3.40.

Вихідні розміри елементів проектування:

Діаметри болтів – $d_2 = d_3 = 0.25$ in (≈ 6.35 мм);

Матеріал болтів – титановий сплав Ti-6AL-4V ($F_{su} = 83$ ksi (≈ 572.2 МПа));

Допустиме навантаження зрізу болта:

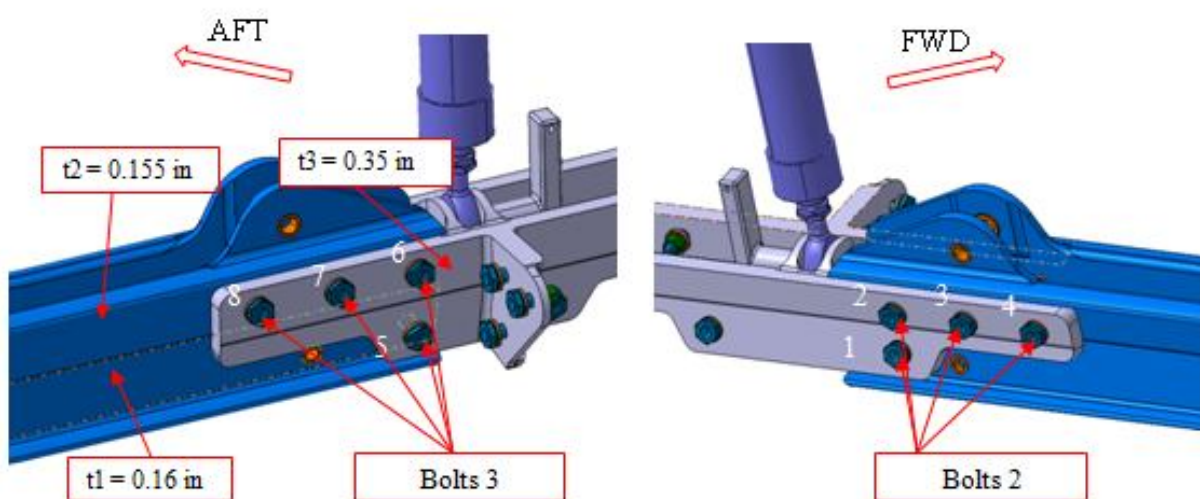
$$P_{ss} = F_{su} \cdot \left(\frac{\pi \cdot d^2}{4} \right) = 83 \cdot 0.0491 = 4075 \text{ lbs } (\approx 18126 \text{ Н}). \quad (3.4.2.1)$$

Товщина рейки – $t_1 = 0.16$ in (≈ 4.06 мм), $t_2 = 0.155$ in (≈ 3.937 мм);

Діаметри отворів рейки – $d_p = 0.2850$ in (≈ 7.24 мм);

Матеріал рейки – алюмінієвий сплав 7075-T7351 (табл. 2.1);

Допустиме напруження зминання - $F_{bru}^{\frac{e}{D}=1.5} = 96000$ psi (≈ 661896 Па).



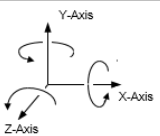
Товщина зрощення – $t_3 = 0.35$ in (≈ 8.89 мм).

Рисунок 3.40 – 3D схема кріплення рейки до зрощення за допомогою болтів

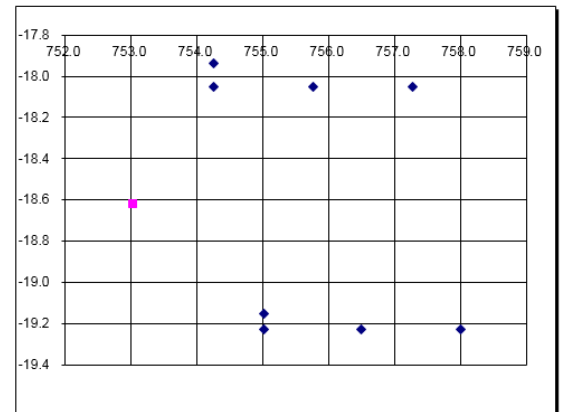
Навантаження, перелічені нижче (рис. 3.41), є конвертом найбільших навантажень для всіх випадків навантаження (від МСЕ). Навантаження з СЕ-моделі застосовуються для 3D зваженого аналізу групи болтів. Болт №1 переносить найбільше навантаження, визначене цією електронною таблицею (див. рис. 3.41).

3-D WEIGHTED FASTENER PATTERN ANALYSIS

Applied Loads									
Forces			Moments			Loads Coordinates			
1 Load #	2 Fx (lb)	3 Fy (lb)	4 Fz (lb)	5 Mx (lb-in)	6 My (lb-in)	7 Mz (lb-in)	8 Xl (in)	9 Yl (in)	10 Zl (in)
1	-1643	-716	-2415	278	-5843	936	753.03	-18.62	299.10
3									

Section Properties			Resultant loads about centroid		
X xz : 755.750	lx : 4.441		Fx : -1643		
X xy : 755.750	ly : 15.101		Fy : -716		
Y xy : -18.617	lz : 16.340		Fz : -2415		
Y yz : -18.617			Mx : 214		
	lxy : -1.991		My : -12257		
Z xz : 299.200	lyz : 0.321		Mz : 2881		
Z yz : 299.200	lxz : 1.958				

Notes:



11 Fast- ener	12 X (in)	13 Y (in)	14 Z (in)	15 Ax	16 Ay	17 Az	18 Px (lb)	19 Py (lb)	20 Pz (lb)	21 P (lb)
1	757.25	-18.05	299.58	1.000	1.000	1.000	-666	41	1322	1481
2	755.75	-18.05	299.58	1.000	1.000	1.000	-666	-295	5	728
3	754.25	-18.05	299.58	1.000	1.000	1.000	-666	-631	-1313	1601
4	754.25	-17.94	298.45	1.000	1.000	1.000	302	-20	-1253	1289
5	755.00	-19.23	299.32	1.000	1.000	1.000	-174	-322	-1292	1343
6	756.50	-19.23	299.32	1.000	1.000	1.000	-174	13	25	176
7	758.00	-19.23	299.32	1.000	1.000	1.000	-174	349	1343	1398
8	755.00	-19.16	298.45	1.000	1.000	1.000	574	148	-1251	1385

Рисунок 3. 41 - 3D зважений аналіз групи болтів

Діюче зрізне навантаження на болт №1:

$$P_1 = \sqrt{P_{1x}^2 + P_{1z}^2} \cdot k_p = \sqrt{(-666)^2 + 1322^2} \cdot 1.15 = 1702 \text{ lbs } (\approx 7571 \text{ Н}). \quad (3.4.2.2)$$

Допустиме навантаження зминання рейки болтом №1:

$$P_{br} = F_{bru}^{\frac{e}{D}=1.5} \cdot t \cdot d_p = 96000 \cdot 0.155 \cdot 0.2850 = 4241 \text{ lbs } (\approx 18344 \text{ Н}). \quad (3.4.2.3)$$

Допускаємо, що болти працюють тільки на зріз.

Запас міцності рейки на зминання (від болта №1):

$$MS_{br} = \frac{P_{br}}{P_1} - 1 = \frac{4241}{1702} - 1 = 1.49 \quad (3.4.2.4)$$

Рейка задовольняє перевірку на зминання.

Запас міцності болта №1 на зріз:

$$MS_{ss} = \frac{P_{ss}}{P_1} - 1 = \frac{5841}{4075} - 1 = 1.39 \quad (3.4.2.5)$$

Болт №1 задовольняє перевірку на зминання.

3.5 Розрахунок NON-9G Load кріплення

Опорне кріплення “кіготь” з’єднується з NON-9G Load кріпленням, як показано на рис. 3.42.

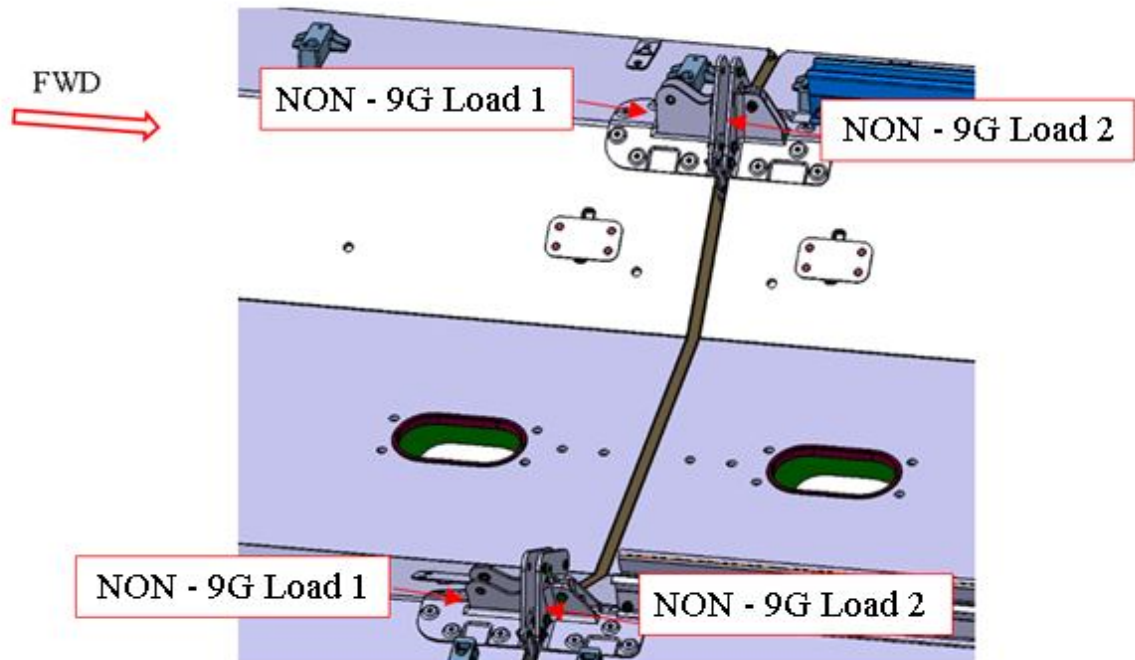


Рисунок 3.42 – 3D вид встановлення NON-9G Load кріплень

NON-9G Load кріплення 1 і 2 виготовляються з пластини з алюмінієвого сплаву 7050-T7451 (див. розділ 2.1, п. 3)).

Максимальне навантаження для провущин NON-9G Load кріплення 1 при випадку навантаження 9G Вперед було взято з MCE моделі: $P_6 = 475 \text{ lb}$ ($\approx 2113 \text{ N}$). Максимальне навантаження з урахуванням коефіцієнта безпеки NON-9G Load кріплення, $k_{\text{NON-9G Load}} = 1.15$ [2], буде:

$$P_{u6} = P_6 \cdot k_{\text{NON-9G Load}} = 475 \cdot 1.15 = 546 \text{ lb} (\approx 10395 \text{ N}). \quad (3.5.1)$$

Максимальне навантаження для провущин NON-9G Load кріплення 2 при випадку навантаження 9G Вперед було взято з MCE моделі: $P_7 = 777 \text{ lb}$ ($\approx 3456 \text{ N}$). Максимальне навантаження з урахуванням коефіцієнта безпеки NON-9G Load кріплення, $k_{\text{NON-9G Load}} = 1.15$ [2], буде:

$$P_{u7} = P_7 \cdot k_{\text{NON-9G Load}} = 777 \cdot 1.15 = 894 \text{ lb} (\approx 3977 \text{ N}). \quad (3.5.2)$$

На рисунках 3.42 та 3.43 показано аналіз статичного напруження NON-9G Load кріплення із використанням стандартної провухини.

Loading

Pu = 546 lb
Py = 0 lb
theta = 90.0 deg

Geometry

e = 0.700 in
D = 0.438 in
t = 0.125 in
W = 1.240 in

Idealized Geometry

W_ax = 1.240 in
e_ax = 0.700 in
t_eff = 0.125 in

Strength Factors

Define strength factors by = Selecting Material ☒ Use recommended fitting factors for D6 Section 4 analysis

material = ALUMINUM
series = 7000
alloy = 7050
temper = T7451
form = PLATE
restriction = 0.25 <= ts <= 8.5

Kaxusrc = D6, Sect 4
KDt = 0.993
Knt = 0.849
Ksb = 0.668
Kaxu = 0.663
Kaxy = 1.104
grain = 6

Ktrusrc = D6, Sect 4
KDt2 = 1.000
Ktru = 0.708
Ctry = 0.793
ts = 0.125 in

Material Properties

Ftuax = 72000 psi
Ftyax = 63000 psi
Elongax = 8.0 %
Fbru = 99000 psi (for e/D=1.5)
pin = Wet

Ftutr = 69000 psi
Ftytr = 59000 psi
Elongtr = 3.0 %
E = 10300000 psi

Calculate Yield Strength

Paxy = 3808 lb
Ptry = 1814 lb
Kthetay = 1.000
Pthetay = 1814 lb
D6Sec4ffy = 1.15
FFy = 1.00
MSy = UNDEF

Calculate Ultimate Strength

Paxu = 4785 lb
Ptru = 2674 lb
Kthetau = 1.000
Pthetau = 2674 lb
D6Sec4ffu = 1.15
FFu = 1.00
MSu = 3.26

Рисунок 3.42 - Аналіз міцності провухини
NON-9G Load кріплення 1

Запас міцності провухини NON-9G Load кріплення 1:

$$MS_{\text{пр1}} = MS_u = 3.26 \quad (3.5.3)$$

Провухина NON -9G Load кріплення 1 задовольняє перевірку на міцність.

Loading

Pu = 894 lb
Py = 0 lb
theta = 30.0 deg

Geometry

e = 0.603 in
D = 0.376 in
t = 0.205 in
W = 0.495 in

Idealized Geometry

W_ax = 0.495 in
e_ax = 0.603 in
t_eff = 0.205 in

W_tr = 0.495 in
e_tr = 0.603 in

Strength Factors

Define strength factors by = ☒ Use recommended fitting factors for D6 Section 4 analysis

material = ALUMINUM
series = 7000
alloy = 7050
temper = T7451
form = PLATE
restriction = Outside Range

Kaxsrc = D6, Sect 4
KDt = 0.985
Knt = 0.974
Ksb = 3.560
Kaxu = 0.959
Kaxy = 0.286
grain = 6

Ktrsrc = D6, Sect 4
KDt2 = 1.000
Ktru = 0.187
Ctry = 0.833
ts = 0.205 in

Material Properties

Ftuax = 72000 psi
Ftyax = 63000 psi
Elongax = 8.0 %
Fbru = 99000 psi (for e/D=1.5)
pin = Wet

Ftutr = 69000 psi
Ftytr = 59000 psi
Elongtr = 3.0 %
E = 10300000 psi

Calculate Yield Strength

Paxy = 1388 lb
Ptry = 706 lb
Kthetay = 0.701
Pthetay = 973 lb
D6Sec4ffy = 1.15
FFy = 1.00
MSy = UNDEF

Calculate Ultimate Strength

Paxu = 1685 lb
Ptru = 991 lb
Kthetau = 0.756
Pthetau = 1273 lb
D6Sec4fu = 1.15
FFu = 1.00
MSu = 0.24

Рисунок 3.43 - Аналіз міцності провушини

NON-9G Load кріплення 2

Запас міцності провушини NON-9G Load кріплення 2:

$$MS_{np2} = MS_u = 0.24 \quad (3.5.4)$$

Провушина NON -9G Load кріплення 2 задовольняє перевірку на міцність.

3.6 Висновки розрахунків проектування

Розрахунки усіх перелічених вище запасів міцності показують те, що обрана конструкція елементів підвісної стелі задовольняє вимоги щодо їх міцності. Мінімальні запаси міцності кожного елемента конструкції виведені в табл. 3.5.

Таблиця 3.5 – Мінімальні запаси міцності деталей конструкції

<u>Деталь</u>	<u>Характер навантаження</u>	<u>Коефіцієнт безпеки кріплення</u>	<u>Величина запасу міцності (MS)</u>	<u>Розділ</u>
Опорне кріплення “кіготь”	Згин + Осьове навантаження	1.33	0.64	3.2
	Аналіз провущини	1.33	2.77	3.2.1
	Зріз заклепки	1.33	3.80	3.2.2
	Зминання	1.33	8.56	3.2.3
Рейка	Згин + Осьове навантаження	1.15	2.61	3.3
	Аналіз провущини	1.15	2.16	3.3.1
	Зріз заклепки	1.15	2.12	3.3.2
	Зминання	1.15	1.49	3.4.2
Болт у з’єднанні рейки з опорним кріпленням “кіготь”	Зріз болта	1.15	4.53	3.4.1
Болт у з’єднання рейки зі зрощенням	Зріз болта	1.15	1.39	3.4.2
NON – 9G Load кріплення	Аналіз провущини	1.15	0.24	3.5

4 РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП ПРОЕКТУ

4.1 Зміст ідеї проекту

В цьому розділі було проведено маркетинговий аналіз стартап проекту, а також визначені можливості та доцільність його впровадження на ринок.

Таблиця 4.1 – Опис стартап-проекту

Зміст проекту	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Оцінка впливу зміни елементів конструкції на розподіл внутрішніх зусиль у підвісній стелі літака при встановленні антени	Машинобудівна галузь	1) Оптимальна зміна елементів конструкції стелі
		2) Розрахунок конструкції при перерозподілу внутрішніх зусиль

Запропонована автором методика проектування конструкції елементів підвісної стелі для встановлення антени дозволяє визначити оптимальні розміри елементів стелі з урахування перерозподілу внутрішніх зусиль цієї конструкції. Ці значення можна використовувати при початковому проектуванні або переобладнання фюзеляжу.

Таблиця 4.2 Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту

№	Техніко-економічні характеристики ідеї	Ідея проекту
1	Підвищення надійності	N
2	Економія витрат часу	S
3	Інформаційне забезпечення	W
4	Економія фінансів	S
5	Складність розрахунку	N

За даними табл. 4.2 бачимо, що конкурентоспроможність проектування даної конструкції досить велика.

4.2 Технологічний аудит

Реалізувати ідею проекту можна за допомогою впровадження розрахункових програм.

Таблиця 4.3 – Технологічна здійсненність ідеї проекту

№	Ідея проекту	Шлях реалізації	Наявність технології	Доступність технології
1	Створення аналітичної та конструкторської документації для забезпечення точного та якісного виробництва деталей	Створення аналітичної та конструкторської документації	наявні	доступно
2	Використання приміщення та спеціалізованого обладнання для виготовлення авіаційних конструкцій	Виготовлення на підприємстві	наявні	доступно
Шлях реалізації і можливості – доступні				

4.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

При ринковому впровадженні проектного розрахунку можуть виникати ринкові загрози, які можуть перешкодити реалізації проекту. Це необхідно враховувати при рішенні поставленої задачі, адже впровадження технології виробництва є досить ускладненим. Отже дати оцінку потенційного ринку стартап-проекту можливо тільки у довгостроковій перспективі, не порівнюючи числові характеристики ринку.

Постійним ринком для представлення ідеї проекту повинні бути різні авіакомпанії пасажирських перевезень та компанії, які виготовляють літаки щодо зменшення технічного обслуговування та покращення конструкції.

Таблиця 4.4 – Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

№	Показники стану ринку	Характеристика
1	Кількість конкурентів, од	3
2	Загальний обсяг продаж, грн/ум.од	7960000
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	зростає

Продовження таблиці 4.4

4	Наявність обмежень для реалізації	немає
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	авіаційні правила
6	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	75%

Потенційних клієнтів можна умовно поділити на первинних та вторинних споживачів продукту. Первинною групою споживачів є компанії-виробники підвісної стелі, вторинною – авіакомпанії, що купують літаки. Орієнтовні вимоги клієнтів зазначені у табл. 4.5.

Таблиця 4.5 – Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія	Вимоги споживачів до товару
Економічність грошових витрат	Авіакомпанії та підприємства-покупці	Співвідношення ціна/якість та ремонтпридатність
Прибутковість	Фірми-виробники	Ефективність конструкції та вага

Щоб провести більш глибокий ринковий аналіз складемо таблиці: 1) факторів можливостей впровадження проекту на ринок, та 2) факторів, що перешкоджають впровадженню проекту на ринок. Вищеназвані фактори загроз та можливостей наведені в табл. 4.6 та 4.7.

Таблиця 4.6 – Фактори загроз

№	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компаній
1	Фінансовий	При впровадженні проекту на підприємстві може підвищитися ціна на обладнання виробництва	Потреба в більш економічному проектуванні конструкції підвісної стелі
2	Технічний	Різкі зміни умов на ринку технічного програмного забезпечення	Постійне відслідковування ситуації на даному ринку

Таблиця 4.7 – Фактори можливостей

№	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1	Поява нового літака	Підвищення попиту на вдосконалену конструкцію з більш аналітичним поясненням розрахунків	Збільшення прибутків компанії підштовхне до збільшення попиту
2	Переоснащення існуючих літаків	Переоснащення конструкції підвісної стелі задля продовження ресурсу літака	Ефективне використання існуючого літака

Більш детальний аналіз конкурентів у даній галузі наведено у табл. 4.8.

Таблиця 4.8 – Детальний аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	Характеристика конкурентного середовища	Вплив на діяльність підприємства
«Чиста» конкуренція	Ринок не має обмежень щодо появи нових конкурентів	Постійне покращення якості проектування задля забезпечення конкурентоспроможності
Рівень конкурентної боротьби за її локацією	Ринок впроваджений у різних країнах світу	Необхідність спільної роботи учасників ринку задля динамічного розвитку
Конкуренція у галузі виробництва	Конкуренція між учасниками в межах однієї галузі виробництва	Постійний аналіз конструкції та її якісне покращення

Надалі проведемо аналіз конкуренції умов конкуренції в галузі за М. Портером (табл.4.9).

Таблиця 4.9 – Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

Складові аналізу	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Клієнти	Товари -замінники
	Немає	Бар'єрів впровадження нема	Boeing, Airbus	Загрози з боку замінників є
Висновки:	Низька інтенсивність ринку	Можуть входити без перешкод	Впроваджують свої інтереси щодо проектування конструкції	Замінники можуть бути впровадженими

Враховуючи проведений аналіз конкурентності в галузі, бачимо, що є можливість виходу даної ідеї на ринок. Щоб бути конкурентоспроможним на ринку даному проекту необхідно розробити програмне забезпечення для швидкісного розрахунку проектних величин. Обґрунтування факторів конкурентоспроможності наведено в табл. 4.10.

Таблиця 4.10 – Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування
1	Точність проектування	Удосконалення програм розрахунку конструкції
2	Швидка перебудова конструкції	Змінення місця встановлення антени, пов'язане з конструкцією фюзеляжу

Після визначення факторів конкурентоспроможності (табл. 4.10) проведемо аналіз сильних та слабких сторін даного стартап-проекту (табл. 4.11).

Таблиця 4.11 – Сильні та слабкі сторони стартап-проекту

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг методики у порівнянні з проектом конкурента						
			-3	-2	-1	0	1	2	3
1	Менша потреба у витратах	20				•			
2	Точність проектування	20					•		
3	Використання отриманих даних	20				•			
4	Швидка перебудова конструкції	15					•		

Фінальним етапом ринкового аналізу можливостей впровадження проекту є складання SWOT-аналізу (матриці аналізу сильних (Strength) та слабких (Weak) сторін, загроз (Troubles) та можливостей (Opportunities) (табл.4.12) на основі виділених ринкових загроз та можливостей, та сильних і слабких сторін (табл.4.11).

Перелік ринкових загроз та ринкових можливостей складається на основі аналізу факторів загроз та факторів можливостей маркетингового середовища. Ринкові загрози та ринкові можливості є наслідками впливу факторів, і, на відміну від них, ще не є реалізованими на ринку та мають певну ймовірність здійснення.

Таблиця 4.12 SWOT- аналіз стартап-проекту

Сильні сторони: Точність проектування та швидка перебудова конструкції	Слабкі сторони: складність впровадження програмної забезпечення проектування
Можливості: завоювання всієї галузі	Загрози: розробка точнішої методики

На основі SWOT-аналізу розробляються альтернативи ринкової поведінки для виведення стартап-проекту на ринок та орієнтовний оптимальний час їх ринкової реалізації з огляду на потенційні проекти конкурентів, що можуть бути виведені на ринок.

4.4 Розроблення ринкової стратегії проекту

Розроблення ринкової стратегії першим кроком передбачає визначення стратегії охоплення ринку: опис цільових груп потенційних споживачів (табл.4.13).

Таблиця 4.13 – Вибір цільових груп потенційних споживачів

№ п/п	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
1	Авіабудування	Повністю готові	Середня	Просто

Для роботи в обраному сегменті ринку необхідно сформувати базову стратегію розвитку (табл.4.14).

Таблиця 4.14 – Визначення базової стратегії розвитку

Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку
Альтернативна	Охоплення на 78-82 %	Конк.№1	Спеціалізація

Далі виберемо стратегію конкурентної поведінки (табл.4.15).

Таблиця 4.15 – Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

Чи є проект «першопрохідцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки
Ні	Так	Копіювати лише загально використані ідеї	Стратегія заняття галузі

Результатом даного підрозділу є узгоджена система рішень щодо ринкової поведінки стартап-компанії, яка визначатиме напрями роботи стартап-компанії на ринку:

- використання в проекті сучасних технологій;
- напрям роботи лише у заданій ніші ринку.

4.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

Першим кроком є формування маркетингової концепції товару, який отримає споживач. Результати попереднього аналізу конкурентоспроможності наведемо у табл. 4.16.

Таблиця 4.16 – Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

№ п/п	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами
1	Не потребує великих затрат на розрахунки	Зменшення собівартості	Достойна оплата праці
2	Підвищений попит у галузі авіабудування	Зменшення кількості ремонтів	Зменшення затрат на розрахунки

Далі визначаємо оптимальну систему збуту, в межах якого приймається рішення (табл. 4.17).

Таблиця 4.17 – Формування системи збуту

Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
Одноразова покупка	Інформування	Глибока	Державне затвердження методики

Останньою складовою маркетингової програми є розроблення концепції маркетингових комунікацій, що спирається на попередньо обрану основу для позиціонування, визначену специфіку поведінки клієнтів (табл.4.18).

Таблиця 4.19 - Концепція маркетингових комунікацій

Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
Комунікабельні	Мережа інтернет, наукові праці	Реклама методики на конференціях	Розширення цільових клієнтів	Показати, що дана методика проектування краща та доцільніша

4.6 Результати маркетингового дослідження:

- Актуальність даного стартап-проекту є дуже великою через унікальність створеної ідеї проектування;
- Попит на ринку стрімко розвивається щодо ідеї даного стартап-проекту;
- Стартап-проект має високу конкурентоспроможність;
- Немає обмеження виходу на ринок.

ВИСНОВКИ

В результаті проведення проектування та аналізу міцності конструкції підвісної стелі пасажирського літака було підібрано основні елементи конструкції, виходячи з основної задачі проектування, та виведено їх запаси міцності. Основними проєктованими деталями були: рейки, запропоновані опорні кріплення “кіготь” та особливі NON-9G Load кріплення.

Під час проектування було побудовано сітку CE у MSC Patran та отримано внутрішні зусилля елементів за допомогою MSC Nastran. Розрахунок проєктних величин було проведено із заснуванням як MCE, так і з використанням формул класичного опору матеріалів. Усі розраховані величини були спроектовані за умови 9G навантаження вперед, як найбільше навантаження, що може буди в аварійному випадку.

Виведені запаси міцності (табл. 3.5) показують, що проєктовані деталі задовольняють умовам міцності і можуть використовуватись при виробництві підвісної стелі.

З боку ринкової спроможності було визначено, що дана ідея стартап-проекту має велику унікальність, попит підприємств, конкурентоспроможність та не має обмежень виходу на ринок.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Federal Aviation Administration
2. Boeing Interiors Requirements
3. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике / О. Зенкевич ; пер. с англ. ; под ред. Б. Е. Победри. — М. : Мир, 1975. — 541 с.
4. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов / Л. Сегерлинд ; пер. с англ. А. А. Шестакова ; под ред. Б. Е. Победри. — М.: Мир, 1979. — 392 с.
5. Стренг Г. Теория метода конечных элементов / Г. Стренг, Дж. Фикс; пер. с англ. В. И. Агошкова, В. А. Василенко, В. В. Шайдурова; под ред. Г. И. Марчука. — М. : Мир, 1977. — 350 с.
6. Бреббия К. Методы граничных элементов / К. Бреббия, Ж. Теллес, Л. Вроубел ; пер. с англ. Л. Г. Корнейчука ; под ред. Э. И. Григолюка. — М.: Мир, 1987. — 524 с.
7. Сегерлинд, Л. Применение метода конечных элементов / Л. Сегерлинд. — М. : Мир, 1979. — 393 с.
8. Michael Chun-Yung Niu Airframe stress analysis and sizing
9. Michael Chun-Yung Niu Airframe structural design
10. Кислов, В. М. Определение физических и геометрических параметров конструкций на основе метода конечных элементов : учеб. пособие / В. М. Кислов ; Владим. гос. техн. ун-т. — Владимир : ВлГТУ, 1994. — 88 с.
11. E. F Brhun Analysis and design of flight vehicle structures
12. Феодосьев В. И. Сопротивление материалов / В. И. Феодосьев. — М. : Наука, 1986. — 512 с.
13. Егер С.М., Мишин В.Ф, Лисейцев Н.К. и др. Проектирование самолетов: учебник для вузов. Под ред. С.М. Егера — 4-е изд. Репр. воспр. текста изд. 1983 г. — М.: Логос, 2005. — 648 с.

14. Писаренко Г. С, Яковлев А. П., Матвеев В. В. Справочник по сопротивлению материалов. — Киев.: Наука, 1975. — 400 с.